

고온고압 조건에서 Two-Photon LIF를 이용한 CO 측정에 관한 연구

오승목* · 김득상** · Paul C. Miles*** · Will F. Colban***

CO Two-photon Laser Induced Fluorescence Measurements in High Temperature and Pressure Conditions

Seungmook Oh, Duksang Kim, Paul C. Miles and Will F. Colban

ABSTRACT

Carbon monoxide (CO) is not only an important intermediate species in chemical reaction mechanisms of hydrocarbon fuel combustion, but also a crucial pollutant species emitted from automotive engines. To better understand the physical processes impacting CO emissions, the development of laser-based measurement techniques that can visualize in-cylinder CO distributions is desirable. Among these techniques, Laser-Induced Fluorescence (LIF) is a sensitive and species-selective detection technique capable of good spatial resolution. However, some technical matters such as deep UV excitation, severe pressure dependency of the LIF signal, and potential interference from other species have been major challenges for CO LIF application. This study is focused on investigating the feasibility of CO two-photon LIF in a direct-injection diesel engine operating at typical pressure and temperature conditions with commercial grade diesel fuel. Spectroscopic analysis shows that the CO fluorescence signal can be separated from C₂ Swan band or broadband fluorescence from PAHs when the signal is collected near 483 nm. The signal-to-noise ratio of CO LIF deteriorate rapidly as pressure is increased, following $P^{-1.49}$ which matches the theoretical signal pressure dependency.

Key Words : Carbon monoxide, two-photon LIF, internal combustion engine, fluorescence pressure dependence

기 호 설 명

CAD Crank angle degree	IVO Intake valve open
FWHM Full width at half maximum	IMEP Indicated mean effective pressure
IVC Intake valve close	ϕ Equivalence ratio

1. 서 론

일산화탄소(CO)는 주요한 연소생성물인 동시에 연소장의 효율을 나타내는 중요한 지표이기도 하다. 탄화수소계 연료는 산화과정을 통하여 CO가 생성되고 CO는 CO₂로 산화하는 과정을 거치게 되는데 공기와 연료의 당량비 조건에 따라 농도가 크게 달라지게 된다. 일반적으로 농후한 혼합기 조건에서는 불완전 연소에 의해 CO의 발생은 크게 증가하기 때문에 CO 농도는 연소장의

* 한국기계연구원 친환경엔진연구센터
 † 연락처, mook@kimm.re.kr
 ** 국민대학교 자동차공학전문대학원 자동차기술연구소
 (Visiting scientist, Sandia National Laboratories, USA)
 *** Sandia National Laboratories, USA

연소효율을 의미하게 된다. 디젤 내연기관과 같이 희박한 연소조건에서는 CO의 몰농도는 10^{-3} 수준으로 낮으나 연소실 벽면에서의 소염(quenching)이나 부분연소(partial oxidation)와 같이 연소실내에 비정상적 연소조건 of 형성에 의하여 발생량이 증가할 수 있다[1]. 특히, 최근에 연구되고 있는 저온연소(low temperature combustion), 예혼합압축착화(homogeneous charge compression ignition)와 같은 신연소기술을 적용할 경우 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(particulate matter)의 배출을 동시에 줄이기 위해 희석(dilution)량을 증가시키에 따라 상대적으로 CO의 배출증가를 야기하게 되었다. 따라서 연소장에서 CO를 측정하는 것은 저온연소조건에서의 연소메카니즘을 연구하는데 있어서 매우 중요한 의미를 갖고 있다[2-4].

연소장 내에서 CO를 측정하기 위한 광계측 방법인 레이저유도형광법(Laser induced fluorescence, 이하 LIF)은 라만산란(Raman scattering)법에 비교하여 신호의 신뢰도가 높으며 2광자(two photon) LIF를 적용하여 CO를 여기시킬 수 있다. 연소장에 존재하는 대부분의 중간 생성물은 200 nm이하의 vacuum UV 영역의 광원이 필요하지만 두개의 광자(photon)을 동시에 흡수함으로써 좀 더 긴 파장대에서 여기가 가능하게 되며 CO의 경우 230.1 nm 근처에서 two-photon LIF의 적용이 가능한 분광학적 특성을 가지고 있다[5, 6].

본 연구에서는 앞에서 언급한 저온연소와 같은 조건에서 발생량이 증가하는 CO의 생성메카니즘을 연구하기 위한 선행연구로써 엔진과 같은 고온 고압 조건에서 CO를 two-photon LIF을 이용하여 측정하고 형광신호 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. CO two-photon LIF

Multi-photon LIF는 2개 이상의 광자를 동시에 흡수하여 특정분자를 여기시키는 조건을 만족시켜야 하므로 확률적으로 Single-photon LIF에 비하여 신호의 세기 및 강도가 약할 수 밖에 없다. CO의 Two-photon LIF의 경우도 신호의 세기는 매우 약하게 나타나므로 노이즈나 다른 분자에 의해 형광신호의 간섭에 취약하게 된다.

Fig. 1는 CO분자의 two-photon LIF 여기과정 및 에너지 분포를 도식적으로 나타낸 그림이다. CO는 230.1 nm 광원에 의하여 $X^1\Sigma^+ \rightarrow B^1\Sigma^+$ 여기가 일어나며 여기된 CO는 다시 $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ 전이과정을 통하여 450~725 nm 영역에서 형광신호를 내보내게 된다 [7, 8]. 그림에서와 같이 CO는 여기과정을 거친

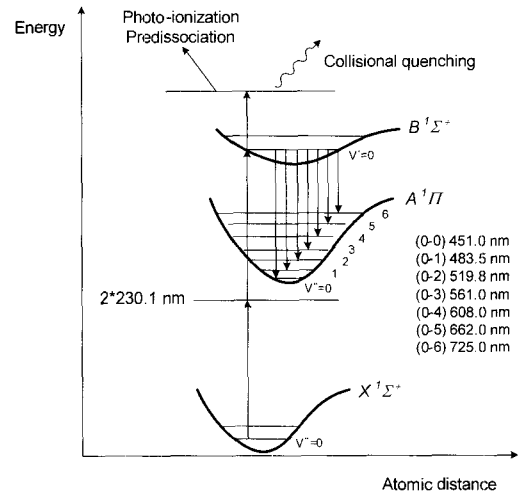


Fig. 1 Schematic energy level diagram relevant to CO detection through two-photon LIF

후 이온화(ionization), 선해리(predissociation), 소광(quenching)와 같은 과정을 통해서도 에너지가 재분배되는데 특히, 소광에 의한 에너지 소실은 매우 불규칙하게 발생하여 신호의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있다. 특히, 고온고압의 조건에서는 충돌소광(collisional quenching)의 빈도가 크게 증가하므로 형광신호의 세기는 더욱 감소하게 된다[9].

3. 실험장치 및 방법

일반적으로 LIF 실험장치는 대상 분자를 여기하기 위한 여기광원부와 형광신호 측정을 위한 수광부로 나누어 진다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 레이저 파장을 1/1000 nm 단위로 변화시킬 수 있는 여기광원은 Nd:YAG (Spectra-Physics, Quanta-Ray Pro-270)와 OPO (Optical Parametric Oscillator, Spectra-Physics, Quanta-Ray MOPO 730)를 사용하였다. Nd:YAG에서 방출되는 532 nm의 레이저광은 OPO와 Frequency doubler를 거쳐 CO 여기파장인 230.1 nm에서 약 5 mJ의 에너지를 갖는 UV 광원을 발생하게 된다. 형광신호를 측정하는 수광부는 광전증배관(photomultiplier tube, 이하 PMT)과 OMA(optical multichannel analyzer)가 사용되었다. 형광신호는 집광렌즈를 통해 PMT로 들어가며 이 신호는 Boxcar averager(Stanford Research Systems, SR 250)에서 적분되어 데이터로 저장된다. 이때 CO의 형광신호를 분리하기 위하여 간섭필터(486.1 nm, FWHM=10 nm)를 사용하였다. 본 연구에서는

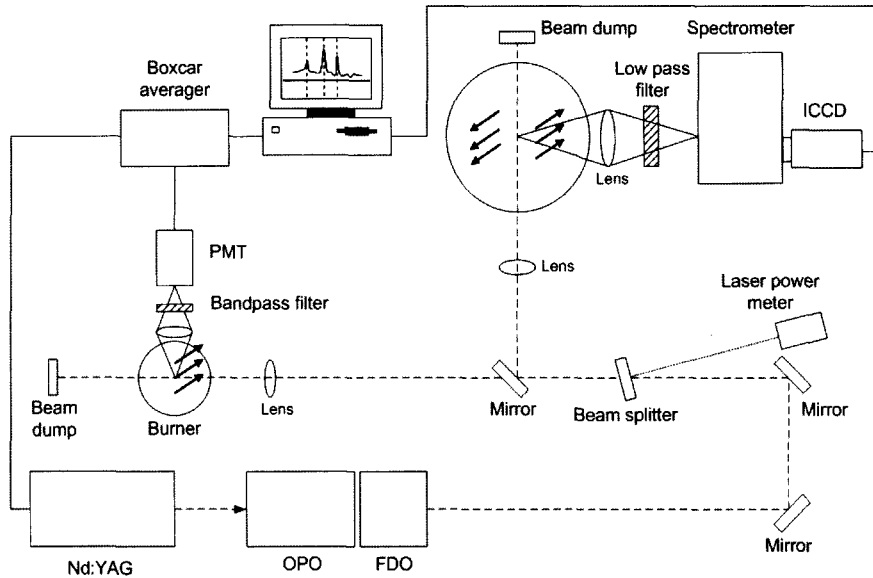


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

형광신호의 검증을 위해 Flat flame burner(McKenna)가 사용되었고 연료는 프로판을 공급하였다. 정확한 여기과장을 확인하기 위하여 여기스캔(excitation scan)과 얻어진 형광신호를 확인하기 위한 형광스캔(fluorescence scan)을 버너화염에서 측정함으로써 CO의 기초 분광학적 특징을 검증하였다. 한편 이것을 통해 실험과정 중에 발생할 수 있는 레이저 과장의 변화를 모니터링하는 것도 가능하게 된다. OMA 시스템은 Spectrometer와 ICCD(intensified charge-coupled device)을 조합하여 구성하였다. ICCD 카메라는 Signal-to-noise ratio를 높이기 위하여 100개의 형광신호를 누적(accumulation)하였다. 형광신호의 측정위치는 화염이 균일하고 안정되었다고 판단되는 버너 중앙에서 5 mm 상부를 측정 위치로 하였다.

고압조건에서의 시험은 단기통가시화엔진에서 수행하였으며 제원은 Table 1과 같다. 가시화엔진은 AC모터에 의하여 구동되며 엔진의 운할 및

냉각문제를 고려하여 운전모드를 3분 이내로 제한하였다. 또한, 연료분사도 4사이클마다 1회씩 분사하여 연소시키는 Skip-fired 모드로 운전하였다. 엔진연소실은 레이저광원의 조사 및 신호 취득을 위하여 3개의 쿼츠윈도우를 설치하였다. 레이저광은 볼록렌즈($f=500$ mm)를 이용하여 연소실 중심에서 엔진헤드 밑면으로부터 5 mm 떨어진 지점을 통과하도록 하였다. 형광신호 취득은 연소실 중심으로부터의 신호를 OMA를 이용하여 측정하였다. 레이저광원의 간섭을 배제하기 위하여 Color glass filter(GG385)를 사용하였다. 연소실 압력은 글로우플러그 삽입 위치를 가공, 압전형 압력센서를 장착하여 모터링 및 연소실협에서 모두 측정하였으며, 측정은 0.25 CAD간격으로 수행되었다. 레이저를 이용한 계측 실험을 수행하기 이전에 연소실의 압력을 모터링 및 연소조건에서 충분히 측정하여, 연소실 압력 및 크

Table 1 Specifications of the test engine.

Basic geometry	
Bore	82.0 [mm]
Stroke	90.4 [mm]
Displacement volume	447 [cm ³]
Compression ratio	16.7
Squish height	0.78 [mm]
Swirl ratio	2.2

Table 2 Engine test conditions

General conditions	
Engine speed	1500 [rpm]
Intake temperature	97.1 [°C]
Intake pressure	1.5 [bar]
IMEP	3 [bar]
Injection timing	BTDC 26.6
EGR	75%
CO supply (only for motored cycles)	3000 [ppm]

랭크각의 관계를 정량화하였으며, 이를 이용하여 레이저 공급 시점을 조정하여 연소실 압력에 따른 LIF 신호 변화를 관찰하였다. 엔진운전 및 실험조건은 Table 2에 정리하였다. EGR(exhaust gas recirculation) 모사를 위하여 N_2 , CO_2 를 첨가하였고 CO 가스는 모터링 실험의 경우에만 사용하였다. Soot, PAH(polycyclic aromatic hydrocarbons)로부터 발생하는 형광신호간섭을 최소화하기 위한 저온연소영역의 운전조건을 선택하였다[4].

4. 실험결과

CO의 여기파장과 형광신호의 특성파장을 위하여 버너화염에서 2광자 LIF 실험을 수행하였다. Fig. 3은 Excitation scan을 통해 얻어진 CO excitation spectrum을 보여주고 있다. 신호의 세기는 레이저 출력으로 나누어 주어 레이저 출력 변화 효과를 상쇄시켜주었으며 전체적으로 레이저광의 세기는 표준편차 0.2 mJ 내에서 안정된 값을 보여 주었다. 230.00 nm 미만의 파장에서는 거의 0의 값을 보이다가, 230.00 ~ 230.05 nm의 영역에서 급격하게 상승하고, 다시 230.05 nm 이후의 파장에서는 CO 형광신호는 나타나지 않았다. 최고값은 OPO 지시값으로 230.041 nm에서 나타났으나 일반적으로 레이저 광학기기는 온도와 같은 주변 환경 변화에 매우 민감하기 때문에 실험 중에도 Resonance 파장을 확인하는 과정을 거쳤다.

Fig. 4는 CO 형광스펙트럼의 결과를 보여주는 그림이다. 그림에서 On-line은 CO의 여기상태 전이를 일으키는 Resonance wavelength를 의미하며, 반대로 Background noise를 측정하기 위해 레이저파장을 Detuning한 경우를 Off-line이라 정의하였다. 각 경우의 레이저 파장은 On-line에

서 230.041 nm, Off-line에서는 전이가 최대한 적게 일어나면서 On-line 파장과 가까운 229.991 nm로 하였다. 세 개의 피크가 나타나고 있으며 이것은 각각 $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ 전이의 519.8 nm($v'=0, v''=2$), 483.5 nm(0, 3), 451.0 nm(0, 4)에 해당하는 것으로 그 외의 진동전이(vibrational transition)는 스펙트로미터 영역밖에 존재하여 나타나지 않고 있다. 또한 레이저광을 off-resonance 파장으로 이동하여 얻은 스펙트럼을 비교해봄으로써 CO로부터의 형광신호임을 확인하였다.

CO의 농도에 따라 형광신호의 변화특성을 알아보기 위하여 당량비(ϕ) 변화에 따른 형광스펙트럼을 Fig. 5와 같이 비교하여 보았다. 당량비가 농후해짐에 따라 연소장에 존재하는 CO의 몰농

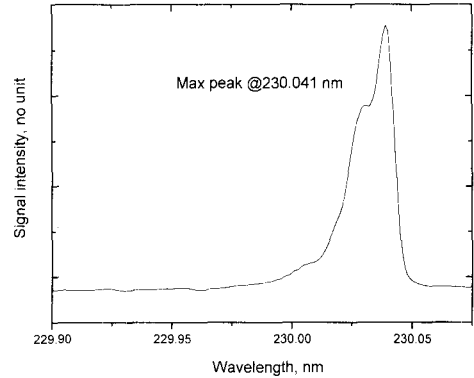


Fig. 3 CO excitation spectrum detected with a PMT and interference filter combination at 486.1 ± 5 nm

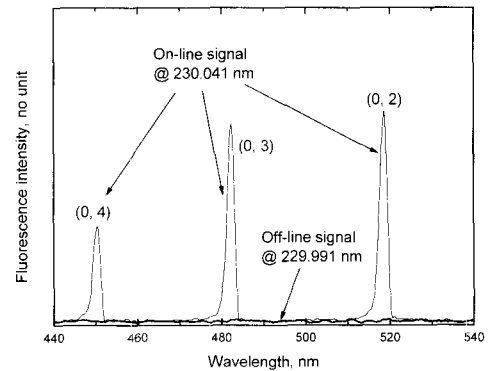


Fig. 4 CO fluorescence spectrum from $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ transition

도가 증가하면서 형광신호의 세기가 비례하여 커지고 있다. $\phi=1.6$ 인 경우 470, 515 nm 근처에서 약하게 CO 형광이외의 신호가 나타나고 있다. 이것은 농후한 연소장에서 불완전 연소에 의해 생성되는 탄소입자로부터 나오는 C_2 Swan system의 일부이다[10]. 일반적으로 연소장에 존재하는 연소생성물은 각기 흡수 및 형광파장대가 다르지만 많은 부분에서 중첩이 일어나며 복잡한 양상을 보이게 된다. CO의 경우도 C_2 Swan system의 발광영역이 유사하여 고분자 탄소입자나 PAH 형광신호와 간섭이 생길 수 있다. 따라서 디젤엔진과 같은 고온고압의 조건 외에도 Soot의 발생빈도가 매우 높은 연소조건에서 CO의 형광신호는 많은 교란을 겪을 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 6은 디젤엔진 운전 중에 CO의 형광신호를 실시간으로 측정된 결과이다. 연료는 디젤엔진연구에서 soot의 발생을 줄이기 위해 사용하는 Surrogate fuel이 아닌 일반경유를 사용

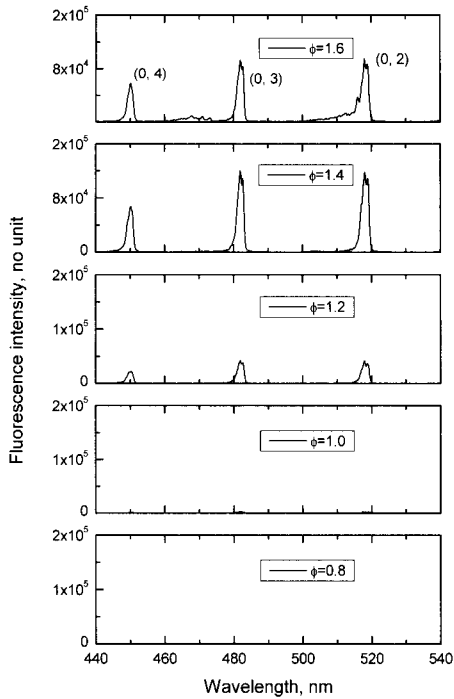


Fig. 5 CO fluorescence spectrum with various equivalence ratios(ϕ)

하였으므로 통상적 엔진연소 조건과 동일하다. 신호의 분포가 Fig. 5와 달리 C₂ Swan system의 신호가 매우 크게 나타나고 있으며 상대적으로 CO의 형광신호는 중첩되거나 약하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Off-line의 경우 C₂ 신호만 강하게 나타나며 CO 형광선이 신호는 보이지 않는다. (0, 2) 전이영역은 C₂ 신호와 대부분 중첩되므로 신호의 세기는 강하지만 측정이 불가능하나, (0, 3), (0, 4) 밴드에서는 간섭필터를 사용하여 측정이 가능함을 알 수 있다. 그러나 이 신호 또한 압력이 증가하면 신호의 세기는 매우 큰 폭으로 감소하여 줄어들고 있다. 30 CAD에서는 CO 형광신호는 거의 관찰되고 있지 않으며 C₂ 신호만이 약하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이때의 연소실 압력은 Fig. 7에서 보면 27 bar 정도로 나타나고 있다.

압력과 형광신호의 상관관계를 검증하기 위하여 일정량의 CO(3000 ppm)를 엔진으로 공급하면서 모터링시 압력 및 형광신호를 측정 한 결과는 각각 Fig.7, 8과 같다. 각 측정 위치는 Fig. 7의 압력선도에 나타난 것과 같으며 측정은 엔진의 피스톤 운동과 퀴즈 윈도우 사이즈의 한계로 30 CAD 까지만 가능하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 형광신호의 세기는 압력증가와 함께 감소하여 Fig. 6과 유사하게 형광신호는 압력의 영향을 크게 받고 있다. 형광신호의 세기와 압력의

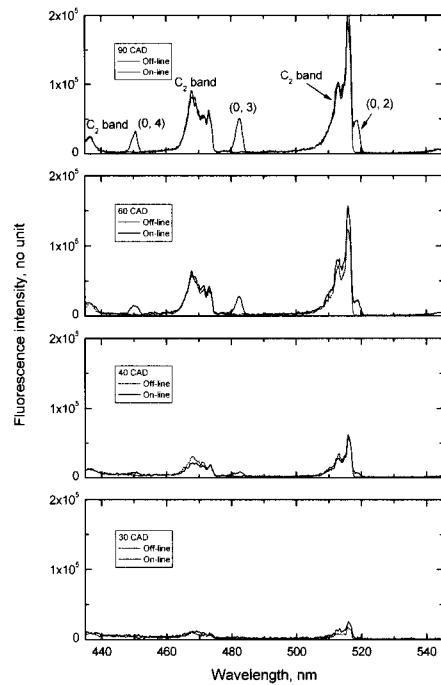


Fig. 6 CO fluorescence spectrum under engine firing conditions.

상관관계를 파악하기 위하여 각 압력 조건별 CO 형광신호를 적분한 결과는 Fig. 9와 같다. 실험결과 형광신호는 $F \propto P^{-1.488}$ 의 상관관계를 보이고 있다. 이러한 상관성은 2광자 LIF를 단순화하여 모델링한 결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다. 실제 여기된 CO의 전이과정은 압력 이외에도 온도, 광이온화, 선해리, CO₂ 광해리 (photodissociation) 등 다양한 변수에 의해 영향을 받게 되어 실제 측정 한 형광신호와 차이를 보일 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, CO 농도의

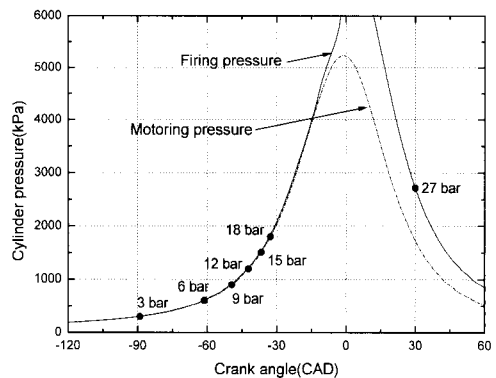


Fig. 7 Pressure traces measured in the engine combustion chamber.

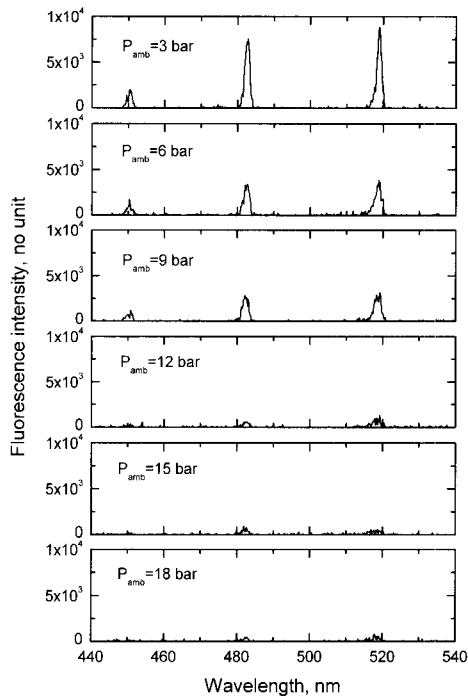


Fig. 8 Pressure dependence of CO fluorescence intensity

정량적 측정을 목표로 할 경우 CO 형광신호에 간섭을 줄 수 있는 여러 인자들이 함께 검토되어 구체적 모델을 개발하고 실험을 통하여 검증하는 과정이 요구된다.

5. 결론

고온고압 조건에서 2광자 LIF를 이용해 CO 농도 측정을 위하여 버너 및 실 엔진에서 형광신호 취득실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

Resonance wavelength을 찾기 위한 CO excitation scan을 버너에서 수행하여 230.041 nm 근처에서 최대형광신호를 얻었다. 형광스펙트럼은 $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$ 진동전이(vibrational transition) (0, 2), (0, 3), (0, 4)에 해당하는 3개의 피크를 얻었으며 Off-resonance 조건에서는 다른 화학종 내지는 연소 중간생성물에 의한 형광신호는 관찰되지 않았다. 그러나, 실엔진 조건에서 측정할 경우 강한 C_2 Swan system 신호가 관찰되었으며 (0, 2) 라인의 경우 대부분의 영역이 중첩되었다. (0, 3), (0, 4) 라인의 경우 C_2 신호의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

형광신호와 분위기 압력의 상관관계는 형광신호가 $P^{-1.488}$ 에 비례하는 결과를 얻었으며 이것

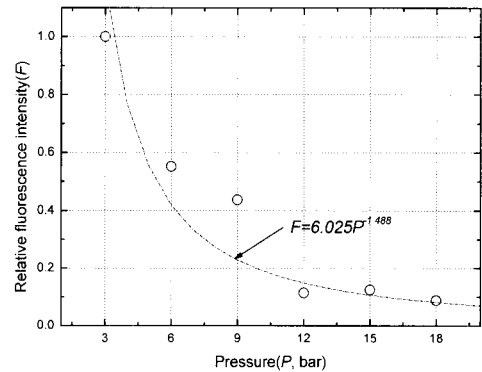


Fig. 9 Cylinder pressure versus Integrated CO fluorescence intensities which were normalized by the value at 3 bar.

은 단순화한 2광자 CO LIF 모델과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 엔진과 같은 고온 고압 조건의 연소장내에서 2광자 LIF의 기법을 이용하여 CO의 측정을 할 수 있었으며 강한 레이저 광원을 이용한다면 CO 분포의 2차원 가시화도 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(KRF-2005-214-D00247)

참고문헌

- [1] Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, p.592, McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.
- [2] Dec, J.E., Sjöberg, C., "A parametric study of HCCI combustion-the sources of emissions at low loads and the effects of GDI fuel injection," SAE paper 2003-01-0752, 2003.
- [3] Kook, S., Bae, C., Miles, P.C., Choi, D. and Pickett, L.M., "The influence of charge dilution and injection timing on low-temperature diesel combustion and emissions," SAE paper 2005-01-3837, SAE Transactions, v.114, 2005.
- [4] Colban, W.F., Miles, P.C. and Oh, S., "On the cyclic variability and sources of unburned hydrocarbon emissions in low temperature diesel combustion systems," SAE paper 2007-01-1837, 2007.
- [5] Dally, B.B., Masri, A.R., Barlow, R.S. and

Fiechtner, G.J., "Two-photon laser-induced fluorescence measurement of CO in turbulent non-premixed bluff body flames," *Combustion and flame*, vol.132, pp.272-274, 2003.

[6] Everest, D.A., Shaddix C.R., Smith, K.C., "Quantitative two-photon laser induced fluorescence imaging of CO in flickering CH4/Air diffusion flames," *Twenty-Sixth Symposium(International) on Combustion*, pp.1161-1169, 1996.

[7] Aldén, M., Wallin, S., and Wendt, W., "Application of two-photon absorption for detection of CO in combustion gases," *Applied Physics B*, vol.33, pp.205-208, 1984.

[8] Haumann, J., Seitzman, J.M., and Hanson, R.K., "Two-photon digital imaging of CO in combustion flows using planar laser-induced fluorescence," *Optics Letters*, vol.11, no.12, pp.776-778, 1986.

[9] F. Di Teodoro and R.L.Farrow, "CO+B2Σ+(v=0) emission induced by laser excitation of neutral CO at 203nm," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 114, No. 8, pp. 3412-3428, 2001

[10] Ikeda, Y., Kojima, J., and Nakajima, T., "Laser diagnostics and spectroscopy for combustion flow," *CLEO/Pacific Rim '99*, vol.3, pp.827-828, Seoul, Korea, 1999.

[11] Eckbreth, A.C., Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species, Taylor & Francis, New York, 1996

부 록

LIF 신호와 압력의 상관성[11]

LIF 기법은 주변의 압력이 높을 경우 여기상태로 전이된 입자가 발광신호를 방출하기 어렵게 되어 신호가 크게 약해지는 문제를 갖고 있다. 이를 극복하기 위해서는 높은 출력을 갖는 레이저를 이용하여 여기상태로 전이되는 입자의 수를 크게 늘려주는 방법을 적용할 수 있으나, 정성적, 정량적으로 압력과 LIF신호의 상관성을 정의할 수 있는 모델을 통해, 신호가 약해지더라도 실험 조건을 역으로 분석하여 측정하고자 하는 입자의 농도를 예측하는 방안도 강구되어야 한다.

LIF를 통해 관측되는 발광신호의 세기는 다음과 같은 비례관계를 갖는다.

$$F \propto \eta_F \times W \times N_1^0 \quad (1)$$

여기서 N_1^0 는 측정하고자 하는 화학물질의 입자

수 밀도, W 는 레이저에 의해 입자가 여기상태로 전이될 확률, 그리고 η_F 는 전이된 입자가 발광에 성공할 확률이다.

Two-photon LIF에서 입자가 레이저를 통해 여기될 확률은 다음과 같다.

$$W \propto \frac{\alpha_{12} I_\nu^2}{h\nu} \propto I_\nu^2 \quad (2)$$

여기서, α 는 입자의 전자 흡수능력을 나타내는 지표이며, I_ν 는 단위면적당 레이저출력, h 는 플랑크 상수, 그리고 ν 는 광자의 파장을 나타낸다. 이를 통해 레이저의 출력이 높을수록 여기상태로의 전이가 잘 일어남을 알 수 있다. 그러나 레이저의 출력이 높다 하더라도, 주위의 압력이 높아지면 입자간의 충돌에 의해 광자의 파장이 변화하게 되며, 이에 따라 여기상태로의 전이를 일으키기가 어렵게 된다. 이러한 현상을 Collisional broadening이라 하며, 레이저의 lineshape을 Gaussian으로 가정하고 broadening에 의한 lineshape을 분자간 평균 자유거리(mean free path) 및 분자 평균속도(mean molecular speed)를 이용하여 계산한 뒤 식 (3)의 적분을 수행하면 Broadening에 의한 레이저 출력과 압력의 상관관계를 구할 수 있다.

$$I_\nu = I_\nu^0 \int_{\nu} L(\nu)g(\nu)d\nu \propto P^{-0.7} \quad (3)$$

즉, 동일한 출력의 레이저(I_ν^0)를 공급하더라도, 실제 여기상태 전이에 쓰이는 레이저 출력은 압력의 0.7 제곱에 반비례하게 된다. 더욱이 Two-photon LIF의 경우에는 두 개의 광자가 작용해야 하므로 여기확률은 압력의 1.4 제곱에 반비례하게 됨을 알 수 있다.

발광에 성공할 확률인 η_F 는 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\eta_F \propto \frac{A}{A+Q} \approx \frac{1}{Q} \propto \frac{1}{P} \quad (4)$$

이때 A 는 전체 여기상태 입자 중 발광에 성공한 입자의 수, Q 는 입자간 충돌에 의해 여기상태의 에너지를 잃어버리고 소멸되어 발광에 실패하는 입자의 수이며, 일반적으로 A 에 비해 Q 가 충분히 크면 소멸에 관여하는 입자수가 발광 확률에 직접적인 영향을 준다고 할 수 있다. 입자간 충돌은 압력에 비례하여 증가하기 때문에, 발광확률 역시 압력에 반비례한다고 볼 수 있다. 다만, 압력이 높을수록 단위체적 내에서 관측하고자 하는 입자를 발견할 확률이 높아지므로, 입자수 밀도는 압력에 비례한다고 할 수 있고, 따라서 LIF 신호의 세기는 압력과 다음과 같은 상관성을 갖는다고 단순화할 수 있다.

$$F \propto P^{-1.4} \quad (5)$$