

〈논 문〉 SAE NO. 953762

레이저 유도 형광법에 의한 연소화염 진단기법 연구

Combustion Flame Diagnostics Using Laser-Induced Fluorescence

김 태 권*
T. K. Kim

ABSTRACT

A laser system and signal aquisition system to use a laser-induced fluorescence technique were arranged to measure NO concentration. To identify the NO fluorescence signal, verification of the fluorescence was performed through use of comparison of the signals taken both in a undoped and doped calibration flames. Finally, the spatial NO number densities in partially premixed flames were found as a function of fuel-tube equivalence ratio(ϕ_c) and overall equivalence ratio(ϕ_o).

주요기술용어 : 레이저 유도 형광(laser-induced fluorescence), 일산화질소(nitric oxide), 부분적 예혼합 화염 (partially premixed flame)

1. 서 론

최근 각종 광학장치 및 레이저 계측기법이 개발됨에 따라 이들을 활용한 연소진단 연구가 활발해 지고 있다. 특히, 레이저 유도 형광법(laser-induced fluorescence)은 몇가지 단점이 있음에도 불구하고 기타 광학적 기법에 비해 신호분석, 공간적 측정이 비교적 용이하여 발전의 속도를 더하고 있다. 레이저 유도 형광법을 복잡한 연소상황에 적용하기에는 아직 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각되지만, 비교적 단순

화된 모델실험을 통하여 연소생성물의 특성 해석에 적용되어지고 있다. 특히, 연소생성물 중 질산화물은 광학적 스모그 및 산성비 등과 밀접하게 연관되어 있어 이에 대한 생성 및 저감 연구가 더욱 중요시 되고 있다. 비록 NO_x생성에 대해서는 어느정도 구조가 알려 지고 있지만¹⁾, 유동과 NO_x chemisty와의 상호관계에 복잡한 문제는 아직 해결되지 않고 있다. 이를 위한 NO의 정량적인 계측에 대한 연구는 최근 laser saturated fluorescence(LSF)기법을 이용하여 계측이 가능함이 알려지고 있다²⁾. 본 연구에서는 이들의 기법을 활용하여 몇 가지 단순화된 화염실험을 통하여 NO농도의 정량적 계측을 수행하고자 하였다.

* 정회원, 계명대학교

2. 실험장치 및 방법

2.1 LIF 및 광학시스템

NO의 LIF계측을 위하여 NO excitation은 γ (0,0)band (파장 \sim 225.6nm)의 $Q_2(26.5)$ line이 사용되었다. 이 파장을 발생시키는 레이저 시스템은 Quanta-Ray DCR-3G Nd:YAG Laser, PDL-2 Dye Laser, WEX-1 Wavelength Extender(WEX)로 구성되었다²⁾. Fig.1에서 보는 바와 같이 WEX에서 나온 빔은 beamsplitter (B)에 의해 나뉘어져 일부는 UV-sensitive photodiode(A)로 가서 triggering pulse로 사용되고, 다른 일부는 1,000mm 초점을 가진 렌즈 (C)를 통과하여 연소실에서 약 250 μ m의 spotsize를 갖는다. 한편, 연소실에 입사되기 전에 산란된 빔을 차단하기 위하여 aperture(E)를 통과한다. 또한, beamsplitter(G)에 의해 일부의 빔은 power monitoring photodiode(I)에 들어가서 beam energy를 조절한다. 234~237nm에서 NO의 $\gamma(0,1)$ band로 부터 발생한 형광신호는 입사 레이저 빔의 90° 위치에서 검출된다. 그 후, 초점거리 200mm fused silica lens(J)에 의해 collimated되고, 초점거리 300mm의 fused silica lens(L)에 의해 집광되어 1/2m monochromator(M)의 슬릿(slit)으로 입사된다. Monochromator 출구 슬릿으로 나온 형광신호는 RCA 1P28B PMT에 의해 검출된다. Monochromator 입구 슬릿의 폭 \times 높이는 120 μ m \times 2mm로 고정되고, collection optics의 확대계수(magnification factor)가 1.5이므로 결국 슬릿은 80 μ m \times 1.33mm 이다.

2.2 형광신호취득 시스템

PMT신호와 2개의 photodiode로 부터 온 신호는 Stanford Research Systems에 의해 샘플링 된다. PMT신호는 SR255 fast sampler (500ps sampling gate)에 의해 분석되어 진다. UV빔 에너지를 조절하는 photodiode신호는 SR250 gated integrator에 의해 취득된다. 이들 신호들은 SR245 computer interface module과 SR265 software package에 의해 기록된다. 수

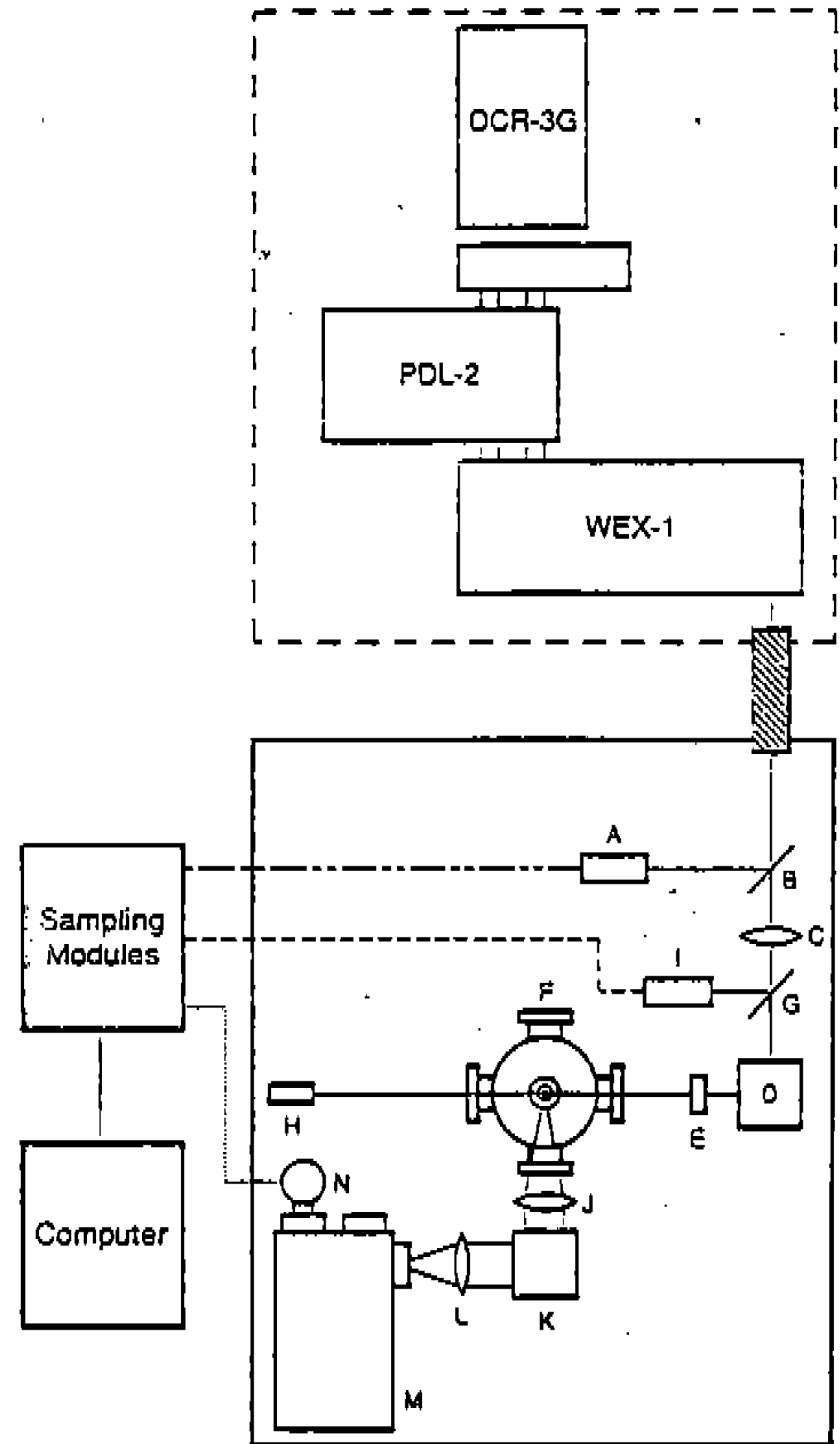


Fig.1 Schematic diagram of LIF system(A-trigger photodiode;B, G-beam splitter; C-1,000mm focal length lens;D, K-beam steering assembly;E-aperture;F-pressure vessel;H-beam dump;I-power monitoring photodiode;J-200mm focal length lens;L-300mm focal length lens; M-1/2m monochromator;N-PMT)

밀도 계측을 위한 형광신호는 500 laser shots를 평균하여 구하였다.

2.3 연소실 및 유로시스템

Carter 등³⁾에 의해 사용되었던 고압 연소장치를 활용하여 Fig.2에서 보는 바와 같은 연료분출 노즐이 설치되었다. 노즐은 3개의 동심 스테인레스 관으로 구성되어 있으며, 내경 4.6mm의 가운데 관에서 연료와 공기를 혼합하여 분출시키고 있다. 실제 첨가되는 공기는 소량으로서 ethane

(C₂H₆)의 상 가연한계(upper flammability limit) 이상의 당량비를 유지하고 있다. 가운데 관 주위는 외경이 1인치의 관으로서 O₂+N₂(희석비 : 3.76)의 공기를 흘려주어 전체 적당량비(overall equivalence ratio)를 1.0 부근으로 유지하고 있다. 가장 바깥쪽 관은 외경이 2인치로서 주위 공기의 영향을 줄이기 위하여 아르곤을 적당량 흘려주었다. 본 실험은 대기압 상태에서 진행되었기 때문에 압력 vessel은 제거하고 plexiglass를 사용하여 주위 유동에 의한 화염의 흔들림을 방지하였다. 연료, 공기, 질소, 아르곤 가스 등의 유량계는 dry tester 체적 유량계와 bubble meter에 의해 검증되었다.

3. LIF계측 및 실험결과

3.1 형광신호의 입증

실험에서 얻어진 형광신호가 NO에 의한 것인지, 아니면 다른 화학종에 의한 것인지를 알아야 한다. 만약 NO검출 영역에서 간섭하는 화학종이

광대역(broadband) 흡수 및 형광 스펙트럼을 갖고 있으면 정확한 NO의 계측이 힘들게 된다. 그러나 흡수 스펙트럼이 불연속적으로 분리되어(discrete)있으면, 여기파장의 선택 여하에 따라서 간섭을 줄일 수 있다. 특히 연료과잉 화염에서 적은 양의 NO를 계측할 경우 높은 레이저 출력을 사용하였을 때 특이한 형광신호가 검출됨을 알 수 있다⁴⁾. 이러한 다른 화학종들의 간섭 상황을 명확히하기 위해 excitation scan에 의해서 간섭의 가능성을 검토해 본다. Fig.3과 Fig.4는 당량비 0.8 화염에서 excitation scan을 보여주고 있다. Fig.3은 N₂없이 O₂만에 의한 화염의 경우(N₂/O₂=0)와 N₂와 O₂의 희석비(dilution ratio)가 3인 화염을 비교하고 있다. N₂가 없는 경우는 당연히 NO형광이 없게 되고, O₂와 같은 다른 화학종의 간섭이 나타나게 된다⁵⁾. 만약 여기(excitation)를 위해 R₁(17.5) line이 사용되었다면 O₂의 간섭이 나타나게 될 것이다. 한편 Fig.3에서 보는 바와 같이 N₂를 주입한 경우에는 NO의 형광신호가 나타나 있음을 알 수 있다.

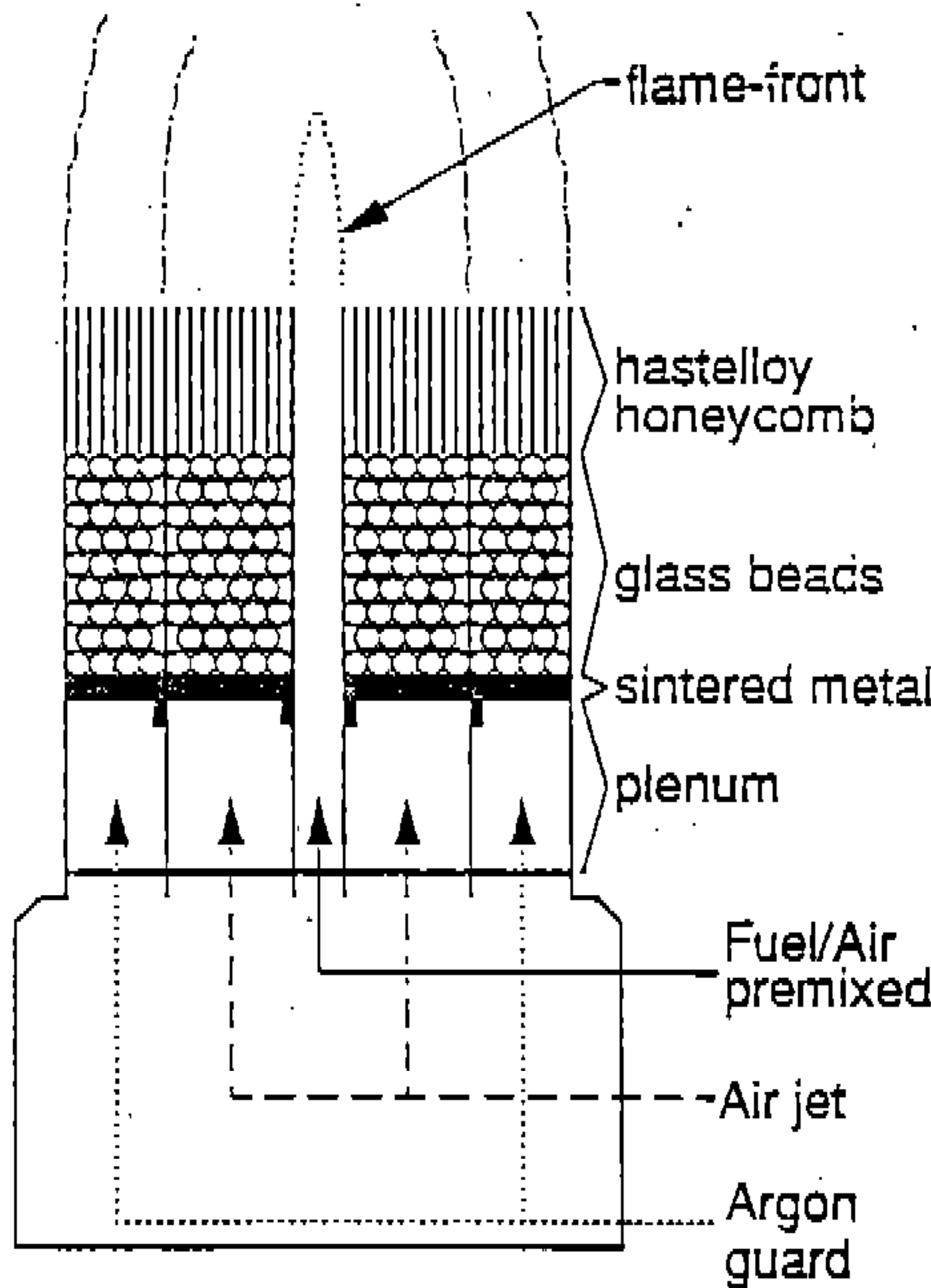


Fig.2 Schematic diagram of fuel injection nozzle

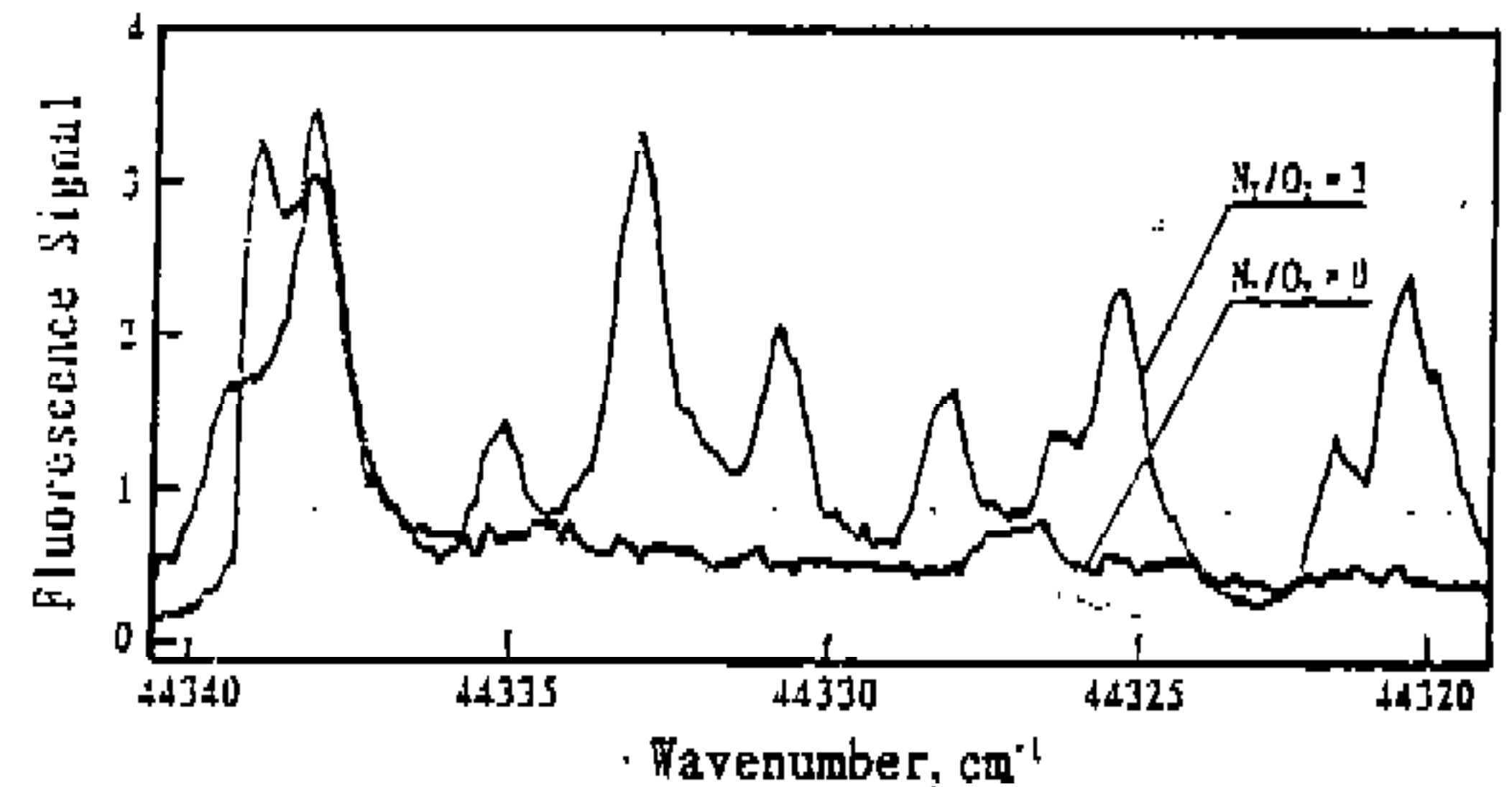


Fig.3 Fluorescence signal of N₂/O₂ = 0 and 3 (Laser energy ~ 1.5mJ/pulse)

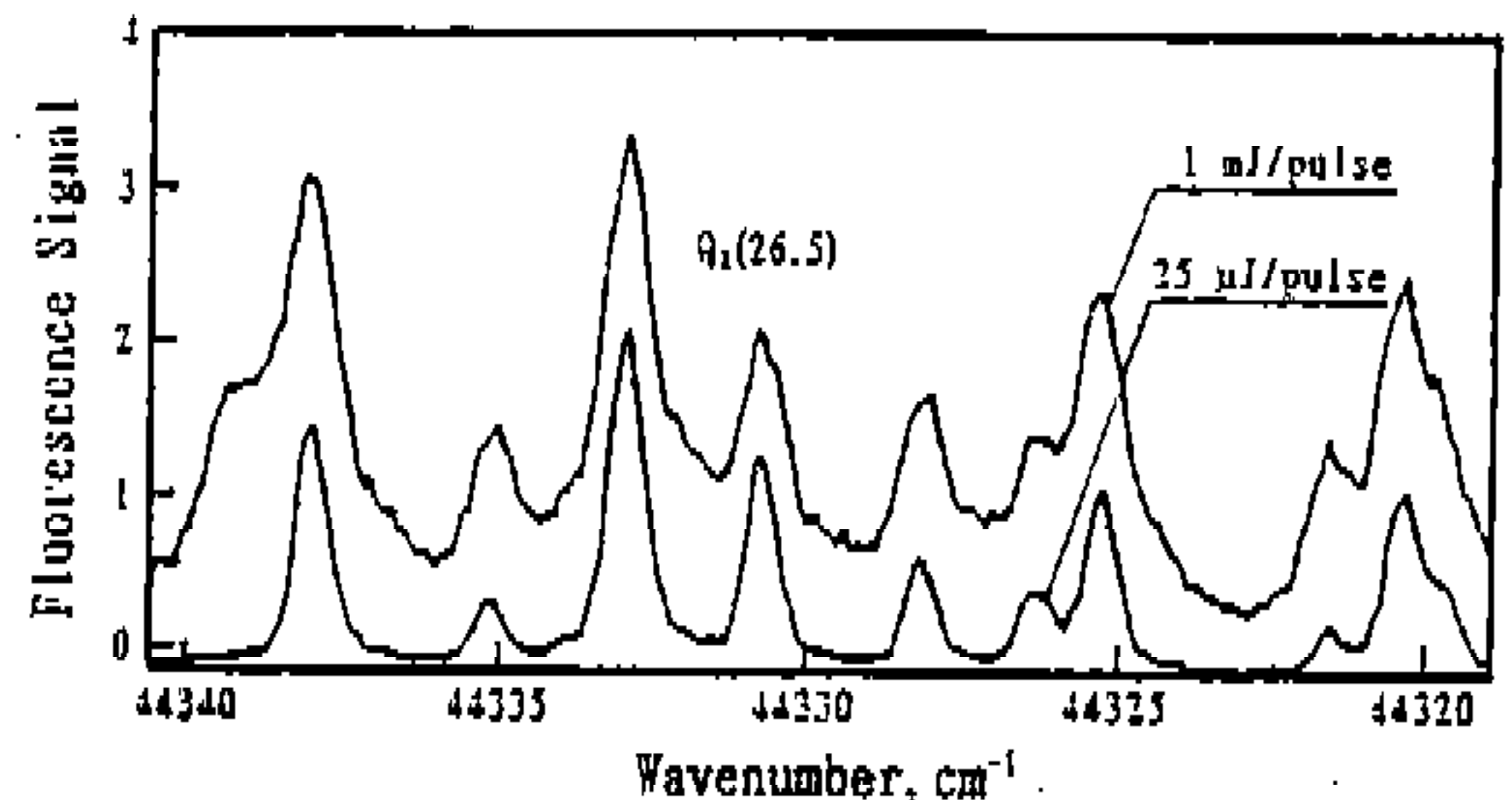


Fig.4 Fluorescence signal at low and high laser energy (N₂/O₂ = 3)

Fig.4의 경우는 레이저 에너지의 변화에 따라서 background 신호의 차이를 보여주고 있다. 높은 레이저 에너지에 대한 scan은 NO line들의 포화가 넓게 나타나고 background 신호 역시 넓게 나타나는 것으로 보여진다. 따라서 background 신호에 대한 형광신호의 비를 크게 하기 위해서는 낮은 레이저 에너지로서 형광신호의 계측을 수행해야 할 것이다. 본 연구에서 여기(excitation)에 사용된 $Q_2(26.5)$ line($\nu \approx 44,331 \text{ cm}^{-1}$)은 이러한 간섭이 거의 없음을 알 수 있다.

3.2 형광신호계측

검증에 사용된 화염은 $\phi_c = 0.95$ 이며, 가운데 관의 전체유량이 3.4slpm(표준 상태 liter/min)이고, 희석비가 3.3이다. 형광신호는 노즐 출구에서 25mm 높이에서 얻어졌으며 각각의 화염에서 얻어진 형광신호와 비교하였다. 검증화염(calibration flame)에서 mole fraction과 형광신호와의 관계를 얻기 위하여, 화염내에 NO를 주입(doping)하는 방법을 사용하였다. 이를 위해서는 2가지 가정이 전제되어야 한다. 첫째, 주입된 NO(doped NO)는 화염내에서 반응하지 않는다. 둘째, 화염내에 존재하는 NO는 주입된 NO량에 비해 소량이다. 실제 이 가정은 Reisel 등⁴⁾에 의해 잘 입증되어졌다. NO를 주입하지 않은 화염의 형광신호와 0~80ppm 범위에서 NO를 주입한 화염의 형광신호에서 Fig.5가 얻어졌다. 형광계측은 노즐 중심축으로 부터 축방향 25mm 위치에서 수행하였다. 형광신호와 주입된 NO는 거의 비례관계를 보이고 있다. 따라서, 주입된 NO는 화염내에서 반응하지 않았음을 더욱 알 수 있다. 본 연구에서는 검증화염(calibration flame)의 화염온도는 계측하지 않았으므로 NO mole fraction에서 NO 수밀도(number density)로 변환하기 위하여 화염온도를 검증화염의 단열화염온도(adiabatic flame temperature)보다 100K 적게 가정하여 본 검증의 화염온도로 사용하였다.

3.3 NO농도의 계측결과

본 실험은 앞서 언급한 NO형광신호 입증 및 검증기법을 활용하여 부분적 예혼합 화염에서

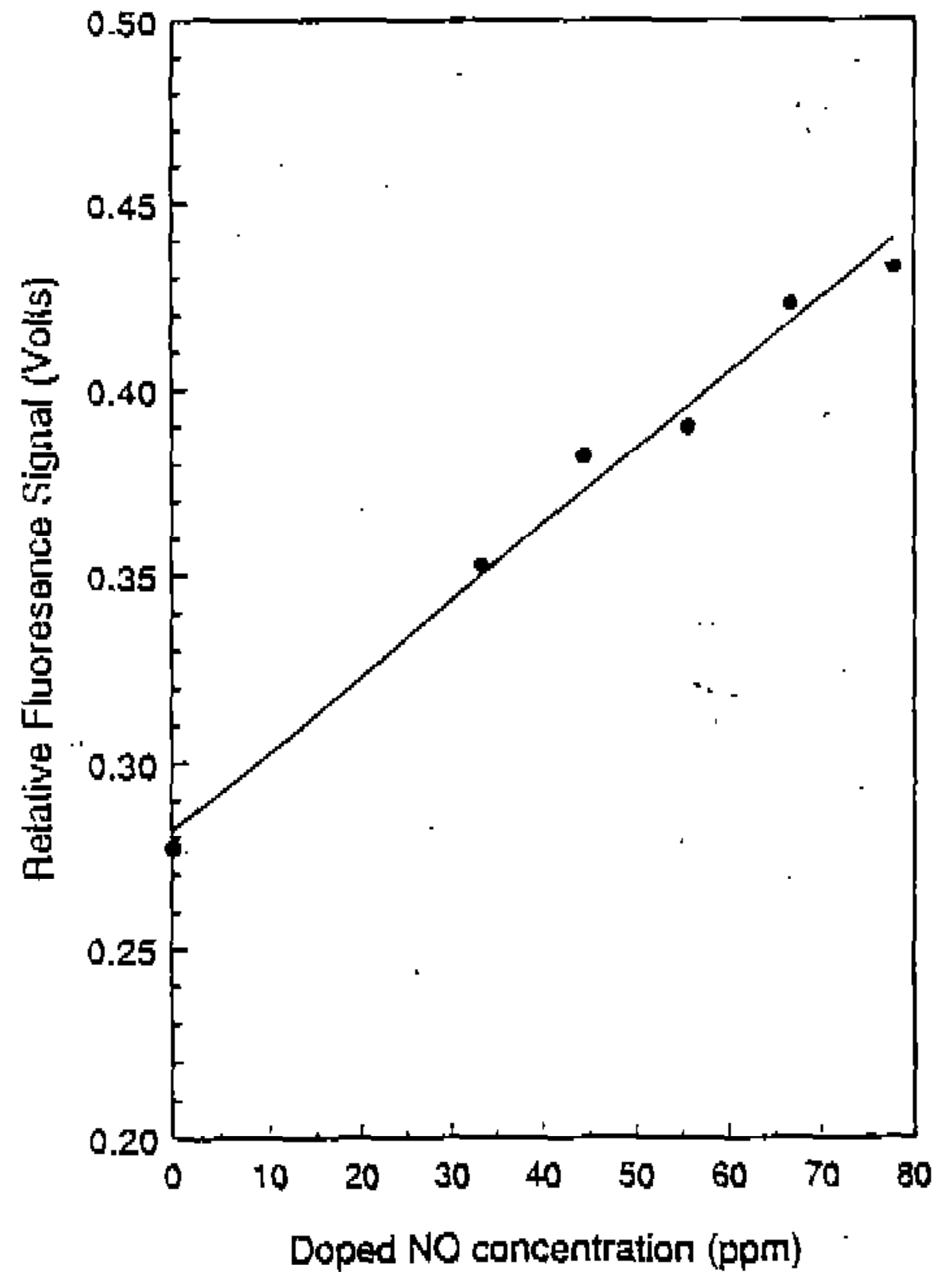


Fig.5 Fluorescence signal. vs. doped NO concentration

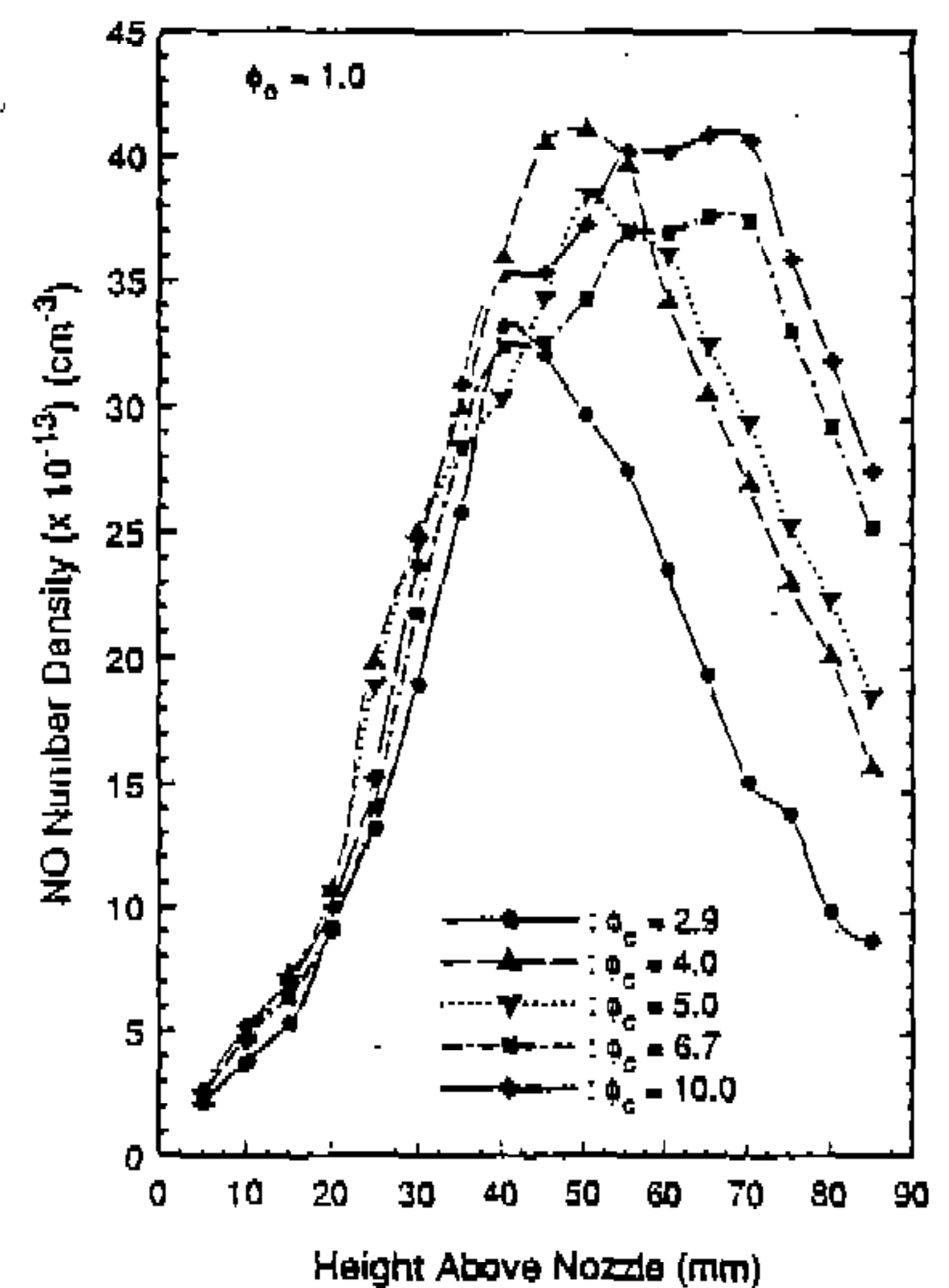


Fig.6 NO concentration. vs. axial location for different equivalence ratios

NO농도의 정량계측을 수행하였다. 가운데 관의 연료에 소량의 공기를 혼합하여 연료과잉 조건을 형성하고 주위에서 공기를 흘려주어 전체적 당량비를 조절하여 NO생성 및 분포를 파악하고자 하는 것이다. 따라서, 본 실험에서는 가운데 관

의 당량비(ϕ_c) 및 전체적 당량비(ϕ_o)를 정의하였다. 실험은 ϕ_c 를 2.76(연료의 상 가연한계)에서 확산화염까지 변화시키고, ϕ_o 는 0.8~1.1의 범위에서 수행하였다. 본고에서는 그 중 대표적인 2가지 화염에 고정하여 결과를 제시하였다.

Fig.6은 노즐 출구에서 후류로 감에 따른 NO 수밀도 및 농도를 보여주고 있다. ϕ_c 는 2.9, 4.0, 5.0, 6.7, 10.1의 5가지 화염의 경우이고 전체당량비 ϕ_o 는 1.0으로 하였다. 노즐 출구에서 축방향으로 높이가 증가함에 따라 NO 발생이 어느 영역까지는 급격히 증가하고 있으며, 그 이후 특정 영역에서부터 급격히 감소하고 있다. 또한 최대 NO가 발생하는 영역은 가운데 관의 당량비(ϕ_c)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, ϕ_c 의 증가에 따라 peak NO가 증가하고 있으며, 아울러 peak NO가 나타나는 위치는 ϕ_c 가 증가함에 따라 노즐 출구로부터의 높이가 높아짐을 알 수 있다. 이는 화염의 형상, soot 생성영역 및 화염영역에서의 온도분포 등과 밀접하게 연관되어 있는 것으로 생각되어진다. 전체적인 수밀도 곡선은 Correa⁶⁾의 결과와 정성적으로 유사한 결과를 보이고 있

음을 제시하고 있다. 본 연구의 경우 노즐 출구 근처에서는 바깥 관의 공기와의 혼합도가 낮아, 주로 가운데 관의 당량비(ϕ_c)에 따라 연소생성물의 특성이 결정될 것으로 생각되고, 후류로 갈수록 전체적 당량비(ϕ_o)의 영향이 지배할 것으로 생각된다. Fig.7은 $\phi_o=1.0$, $\phi_c=2.9$ 의 조건에서 반경방향에 따른 NO의 peak를 보이고 있어 화염대(flame front)에서 주로 NO가 생성되고 있음이 확인된 것이다. 또한 중심축에서의 NO농도는 노즐면에서의 높이가 높아짐에 따라 증가하고, peak NO는 점차 감소하는 성향을 보이고 있다. 축방향으로 감에 따라 중심축에서의 농도가 전반적으로 높아지고 있으며, 반경방향으로의 퍼짐(dispersion)이 확실하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 화염형상과 관련지어 생각하여 보면 화염대의 폭이 넓어져서 나타난 현상으로 생각된다. 한편, Fig.8은 Fig.7과 같은 조건에서 전체당량비를 0.9로 변경한 경우이다. Fig.7에 비해 희박연소 조건이며 따라서 전반적으로 NO의 농도가 Fig.7에 비해 감소하고 있는 성향을 관찰할 수 있다.

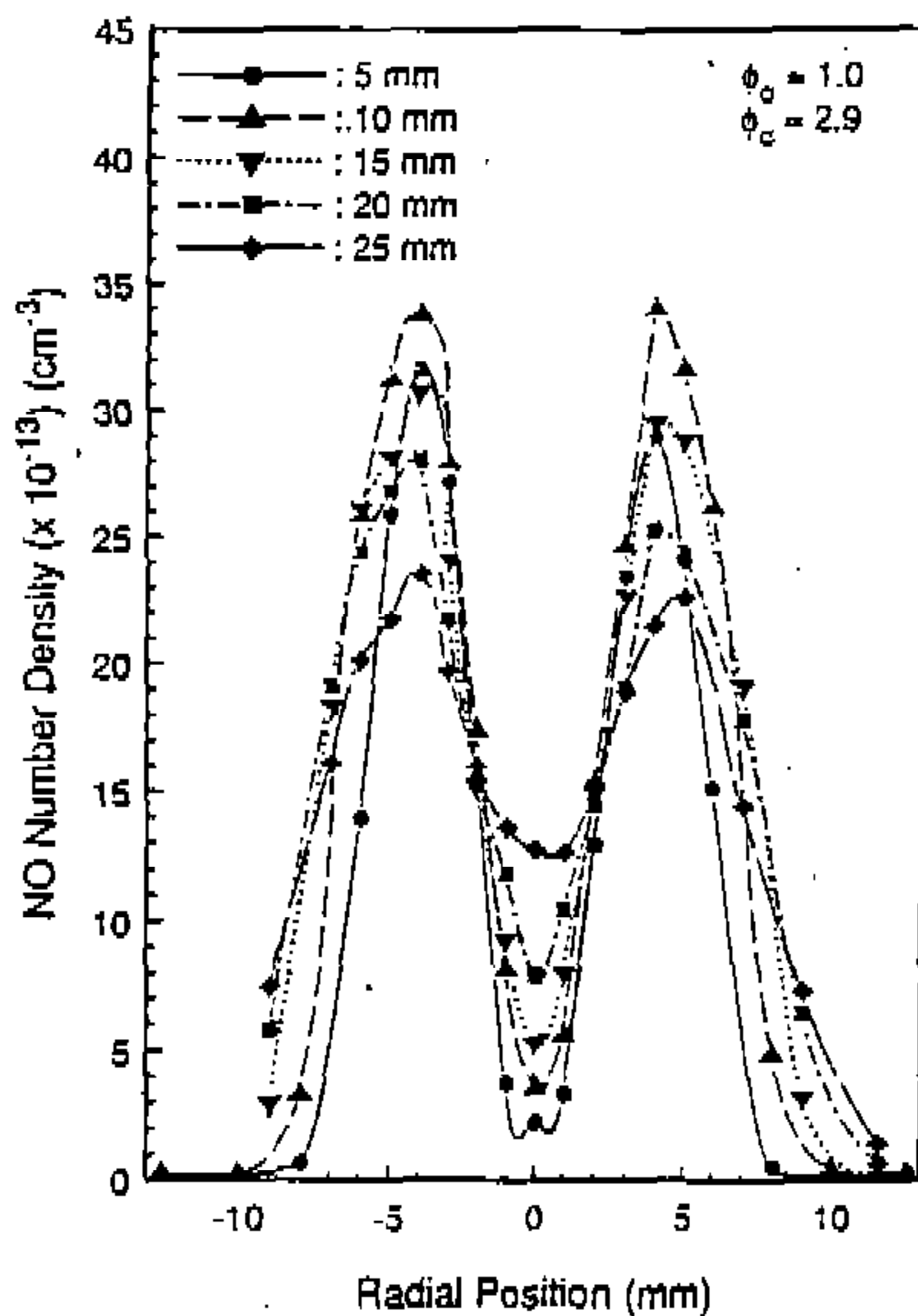


Fig.7 NO concentration. vs. radial location ($\phi_o=1.0$) for different axial positions

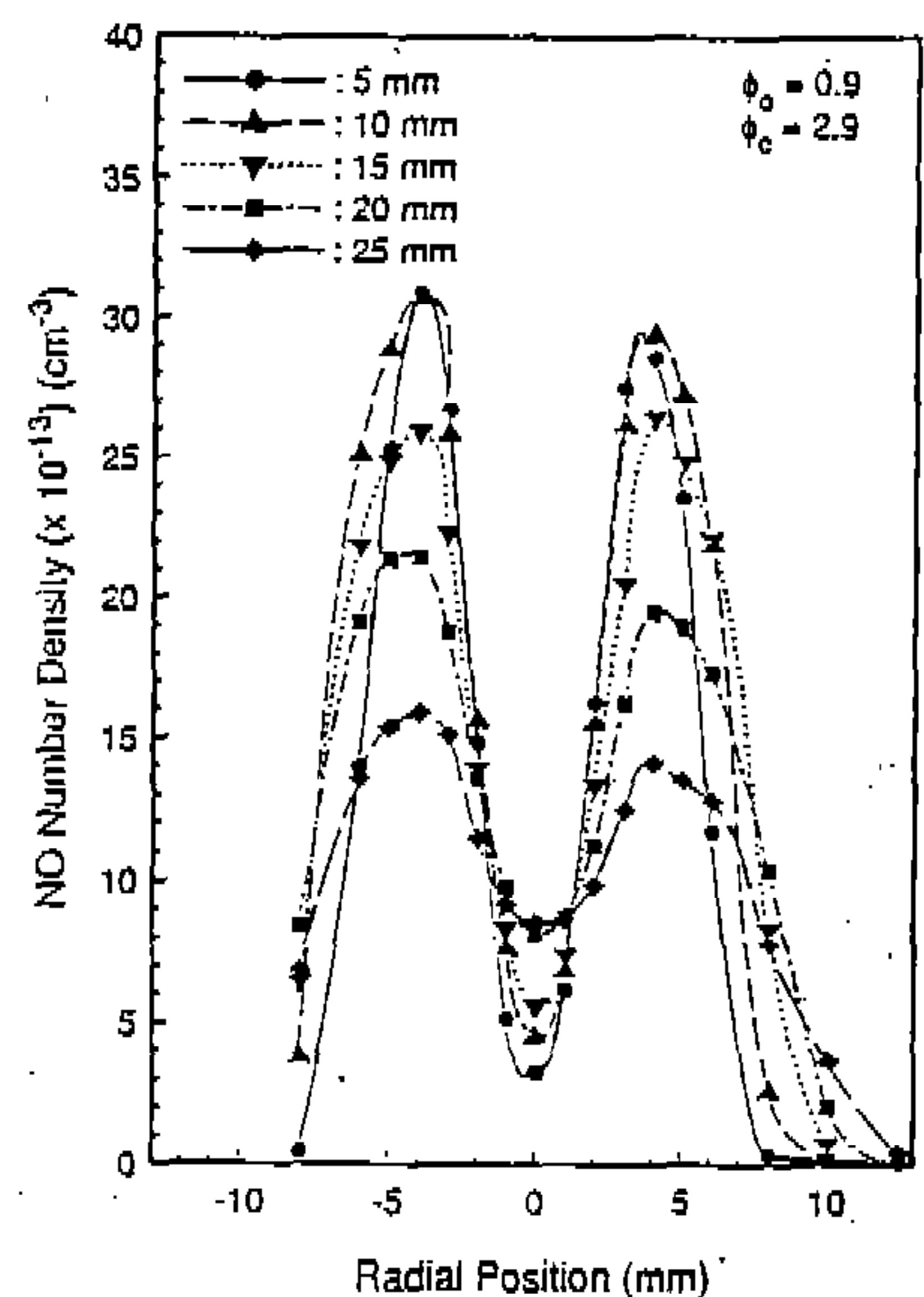


Fig.8 NO concentration with radial location ($\phi_o=0.9$) for different axial positions

4. 결 론

본 연구는 레이저유도 형광법에 의한 연소생성물의 광학적 정량적 계측을 위하여 추진되었으며, 실제 엔진 연구에 본 기법을 적용시키기 위한 기초단계로서, 부분적 예혼합 화염을 형성시켜 NO의 공간적 분포를 계측하였다. 레이저 유도 형광신호 취득을 위한 LIF계측 시스템의 구성이 진행되었고, LIF에 의한 형광신호의 검출 및 검증이 수행됨에 따라 연소생성물, 특히 NO의 농도 계측기법이 확립되었다. 또한, 부분적 예혼합 화염 계측 결과에서 NO 농도의 정량적 공간적 분포가 확인되었다.

- 1) 노즐 출구에서 축방향으로 높이가 증가함에 따라 NO 발생이 어느 영역까지는 급격히 증가하고 있으며, 그 이후 특정 영역에서부터 급격히 감소하고 있다. 또한 최대 NO가 발생하는 영역은 가운데 관의 당량비(ϕ_c)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 노즐 출구 근처에서는 바깥 관의 공기와의 혼합도가 낮아, 주로 가운데 관의 당량비(ϕ_c)에 따라 연소생성물의 특성이 결정될 것으로 생각되고, 후류로 갈수록 전체적 당량비(ϕ_c)의 영향이 지배할 것으로 생각된다.
- 3) 반경방향에 따른 NO 계측에서, 후류로 갈수록 농도의 반경방향 퍼짐(dispersion)을 관찰할 수 있으며, 반경 4~5mm 부근에서 NO의 peak를 보이고 있어 화염대(flame front) 근방에서 주로 NO가 생성되고 있음이 확인되었다. 축방향으로 감에 따라 중심축에서의 농도가 전반적으로 높아지고 있으며, 반경방향으로의 퍼짐이 확실하게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

본 연구는 계속적인 실험데이터 축적에 의해 수치해석 모델의 기초자료를 제시하게 될 것이

며, 화염영역과 비 화염영역에 간의 온도구배가 있으므로 Boltzmann fraction의 변화를 주목할 것이며, 또한, soot 생성 영역에서의 본계측기법이 검증되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Miller, J.A. and Bowman, C.T., "Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion," Prog. Energy Comb. Sci., vol.15, pp.287-388, 1989.
2. Reisel, J.R., Carter, C.D., Laurendeau, N. M., and Drake, M.C., "Laser-saturated fluorescence measurements of nitric oxide in laminar, flat, $C_2H_6/O_2/N_2$ flames at atmospheric pressure," Comb. Sci. Technol., vol. 91, pp.271-295, 1993.
3. Carter, C.D., King, G.B., and Laurendeau, N.M., "A combustion facility for high pressure flame studies by spectroscopic methods," Rev. Sci. Instrum., vol.60, pp.2606-2609, 1989.
4. Reisel, J.R., Laser Saturated Fluorescence Measurements of Nitric Oxide in Atmospheric Pressure Flames, M.S. Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, 1991.
5. Wysong, I.J., Jeffries, J.B., and Crosley, D. R., "Laser-induced fluorescence of $O(3p^3P)$, O_2 , and NO near 266nm : photolytic interferences and simultaneous excitation in flames," Opt. Lett. vol.14, pp,767~769, 1989.
6. Correa, S.M., "A review of NOx formation under gas-turbine combustion conditions," Comb Sci. Technol., vol.87, pp.329-362, 1992.