

산업용 고부하버너 연소에서의 NO_x 형성 및 저감에 관한 연구(I)
- 레이저 유도 형광법(LIF)를 이용한 이중선회 확산화염의 NO 농도 분포 측정 -

박경석 · 김경수

경희대학교 기계산업시스템공학부, 한국생산기술연구원

A Study on Nitric Oxide Formation & Reduction in Industrial Burner (I)
- NO Concentration-Distribution in Double Swirling Diffusion Flame by LIF -

Kyoung-Suk Park and Kyoung-Soo Kim

College of Mechanical & Industrial System Engineering, Kyung Hee Univ.
Korea Institute of Industrial Technology

요 약

본 연구는 산업용 고부하 버너연소에서의 NO_x 저감에 관한 실험적 연구이다. 본 연구에서는 NO_x의 정량적 농도 분포 측정을 위하여 레이저 유도 형광법을 사용하였다. XeCl 엑시머 레이저를 사용하여 NO A-X (0, 0) 진동밴드를 226 nm로 여기하였다. 또한 P₂₁+Q₁(14.5)/R₁₂+Q₂(20.5)/P₁(23.5) 전이를 여기라인으로 하였으며 다른 간섭의 영향을 최소화 하였다. 본 실험에서 이중선회 확산화염에서의 NO 농도 분포를 측정하였으며, 이 스윙버너에서의 화염의 후류에 있어서 NO 농도는 1차/2차 공기비가 증가할 때 감소함을 알 수 있었다.

Abstract— This experimental study deals with on Nitric Oxide Formation & Reduction in Industrial Burner. In this study, Laser-induced fluorescence (LIF) techniques have been used for quantitative measurements of Nitric Oxide. The NO A-X (0, 0) Vibrational band around 226 nm was excited using a XeCl excimer-pumped dye laser. And on-line excitation used P₂₁+Q₁(14.5)/R₁₂+Q₂(20.5)/P₁(23.5) transition, for minimizing the other interferential effect. The measurements were taken NO concentration distribution in double swirling diffusion flame. In this swirl burner, NO concentration in downstream to the flame decrease as primary/secondary air ratio increases.

1. 서 론

환경 오염 문제가 전 세계적으로 대두되면서 보일러, 발전 설비, 엔진 등으로부터의 대기오염 물질의 방출은 심각한 사회문제로 확장되고 있다. 연소 관련 설비가 대기오염의 주원인임을 실감하면서 연소 관련 설비의 최적 설계는 연료의 고 효율화와 더불어 배기가스의 최소화라는 상반된 명제를 해결해야 하는 시점에 이르게 되었다.

화석연료에 세계가 의존하고 있다는 점과 연소할 때 생성되는 오염물질에 대한 제약이 늘어나고 있다는 점에서 연소과정에 대한 보다 더 세부적인 이해의 중요성은 결코 간과되어 질 수 없다. 상호 의존적인 수많은 변수들은 효율성, 연료소비, 오염물질 생성, 비용과 신뢰도 측면에서 기술적 연소 시스템의 일반적 성능을 결정

짓는다. 따라서 연소과정에 대한 컴퓨터 시뮬레이션은 연소시스템 설계와 해석에 중요한 역할을 수행하고 있다. 그러나 오늘날, 연소시스템은 많은 중요한 특성들에 대하여 세부적으로 적절히 만들어지지 못하고 있다. 난류 유동장과 국소적인 화염의 소멸 예측, 탄화수소 방출, 매연 형성과 엔진 이상연소 등을 모델화하기 위한 화학반응의 복합적인 상호작용을 시뮬레이션 하는 데에 최근 발전이 이루어지고 있는 반면, 실제적인 연소에 대한 포괄적인 설명은 현재 컴퓨터 모델들의 능력에 비해 훨씬 뒤쳐져있다.

버너를 개선시키기 위해서는 연소 장치의 작동에 대해서 상세히 이해하는 것이 중요하다. 대개의 실제 장치들에서 화학 반응, 교란에 의한 혼합 및 액체의 증발들이 상호 작용 할 때는 정확한 모델링을 할 수 없다. 그래서 모델에 의한 예측이 실험과 일치하지 않는 경우

가 많다. 또한, 씨머커플이나 샘플링 프로브를 이용한 온도 계측이나 화학적 분석은 이들에 의해 반응 촉진, 질량 교환을 가져올 수 있으며, 공간적·시간적 분해능이 나쁜 단점이 있다. 따라서 연소진단 및 유해 배기가스 저감을 위한 연구를 하는데 있어, 비침투적이며 공간 및 시간 분해능이 좋은 레이저 기법과 이를 통해 연소 현상의 다양한 정보의 실시간 측정이 가능하다. 특히 레이저 유도 형광법(Laser Induced Fluorescence, LIF)¹¹은 연소과정에서 생성되는 NO의 농도를 측정하는데 널리 사용된다. 레이저를 이용한 다른 연소 진단기법과 비교하여 LIF법은 검출된 신호가 비교적 강하며, 원자, 분자나 라디칼 같은 특정한 화학종을 선택하여 ppm이나 혹은 sub-ppm 수준까지 측정할 수 있다.

본 연구의 주요 내용은 레이저 기법을 이용한 정량적인 NO 측정이다. 따라서, 아직까지 국내에서는 레이저를 이용한 정량적인 NO의 측정이 미흡한 단계이기 때문에 이 점에 주력하고자 한다. 즉, 레이저를 이용하여 연소장내에서 생성되는 NO에 대한 계측기술을 확보하고 이를 통하여 다양한 조건의 화염내에서 NO가 국소적으로 과다하게 생성되는 곳의 위치와 그 발생량을 파악하여 향후 버너의 NO 배출량의 저감을 위한 연구에 활용하고자 하였다.

2. 버너연소에서 질소산화물 저감대책

저 NO_x를 얻기 위한 방법¹²으로는 저산소 연소, 연소실 열부하 저감 연소용 공기온도의 저감 등 운전 조건의 변경에 의한 방법과 배기가스 순환, 다단연소, 증기·수분사 등의 연소 방식을 변경하는 방법 및 N 성분이 적은 연료를 사용하는 방법 등이 있다. 아울러 미립화 등의 분무 특성도 NO_x 저감에 중요한 인자가 된다.

2-1. 저과잉공기(Low Excess Air Firing, LEA)

가장 간단하고 효과적인 연소 제어기술로서, 연소역에서의 산소 농도를 거의 화학양론적 농도에 가깝게 제어함으로써 NO_x를 줄이는 방법이다. 즉, 공기와 연료의 양호한 혼합과 적절한 연소상태를 제공하기 위해서 필요한 과잉공기량을 어느 제한점까지 줄이는 것이다. 결과로서 열효율의 증가를 가져오고 그 만큼 고온 NO_x의 생성을 줄인다. 이 방법은 과잉공기량을 줄임에 따라 CO 배출이 증가되기 때문에 NO_x 저감 정도에 제약이 따른다.

2-2. 다단연소(Staged Combustion)

NO_x 제어를 위한 이 방법은 버너의 작동을 농후-희박 단계의 연소로 만들기 위해 개선하는 것이다. 이것은 상류버너를 농후한 상태로 운전하면서 하류 버너는

공기만을 공급하도록 조정하여 이를 수 있다. 또한 어떤 버너는 농후한 상태로 운전하도록 조정하고 하류의 공기구를 통해 부가적 공기를 공급하는 방식도 있다.

2-3. 배기가스 재순환법(Flue Gas Recirculation, FGR)

이는 희석제를 주입하여 연소온도를 줄이는 한가지 방법으로서, 간단히 배연가스의 일부를 연소공기의 대체로서 연소로의 제1연소역으로 되돌려 보내는 것이다. 이는 연소역에서의 화염온도와 산소농도를 동시에 감소시키면서 고온 NO_x의 생성을 감소시킨다. 한편 화염의 불안정과 순수 열회수 효율의 감소 때문에 순환되는 유량은 제한된다. 통상 연소공기의 10~20% 수준으로 연소공기에 주입되는 배연가스는 단열 화염온도를 낮추고 국부적으로 산소 농도를 줄이므로 NO_x 배출을 줄이기에 충분한 희석제를 제공한다. 보통이 경우에 있어서 FGR은 NO_x 배출을 15~30% 줄일 수 있다. 또 FGR에 의한 연소온도의 감소는 고온 NO_x를 줄이는데는 효과적이지만, 연료 NO_x에는 영향을 미치지 않으므로, 석탄, 잔사유, 고질소함유 연료 등을 연소하는 보일러에서는 사용되지 않는다.

2-4. 산소/가스연소(Oxy/gas Combustion)

연소 시스템에서 질소의 농도는 연소공기에 부가적인 산소를 공급하면 낮출 수 있다. 충분히 많은 산소를 추가하면 연소 온도가 증가하는 것보다 N₂ 농도가 줄어드는 쪽이 커서 NO_x 배출 수준이 저감된다.

2-5. 재연소(Return)

전체 연료의 약 15%를 연료 회박의 주 연소 영역의 후류에 도입한다. 재연소 영역 내에서, NO는 Fenimore 메커니즘에 연관된 것들과 유사하게 탄화수소와 HCN과 같은 탄화수소 중간 생성물과 반응을 함으로써 저감된다.

2-6. 선택적 비촉매저감방식(Selective non-catalytic reduction, SNCR)

후연소 제어 기술로 암모니아, 요소, 또는 시안산과 같은 질소를 함유하는 첨가제를 연소가스에 분사하여 혼합시키면 촉매의 도움없이 NO를 N₂로 화학적으로저감시키는 효과를 이용한 것이다. 이 방법에서는 온도가 중요한 변수가 되며 많은 양의 NO_x 저감을 달성시키기 위해서 비교적 좁은 온도 범위에서 작동이 요구된다.

2-7. 선택적 촉매 저감방식(Selective catalytic reduction, SCR)

촉매가 NO를 N₂로 저감시키는 암모니아 분사와 연

계하여 사용된다. 효과적인 저감을 위한 온도 범위는 사용되는 촉매에 따라 다르지만 480~780 K 범위에 있다. SNCR에 비해 SCR의 장점은 더 큰 NO_x 저감이 가능하고 작동 온도가 더 낮다는 데 있다.

3. 레이저에 의한 연소 가스 분석

3-1. 레이저 연소진단 기법

레이저 연소 진단 기법은 고온, 고압의 연소장내에서 주요한 라디칼들(radical)의 생성을 방해하지 않고 비접촉(non-intrusive)으로 원하는 생성물의 농도나 온도, 공연비 또는 유속 등을 측정할 수 있다는 데에 가장 큰 장점이 있다. 따라서 레이저 진단법은 다양한 연소현상을 연구하는데 널리 사용되고 있다^[3].

레이저광을 분자 및 입자로 구성된 가스 및 연소장에 조사하는 경우 가스 및 연소장내 물질과 레이저광 사이에는 여러 가지 상호작용이 존재한다. 여기서 분자들은 진동과 회전에 의한 에너지 준위를 갖는다고 가정하며, 분자, 혹은 입자에 의한 흡수 과정을 제외하고는 상호작용의 모든 형태는 방출되는 주파수에 의하여 모든 방향에서 검출될 수 있다. 이때 각각의 측정 방법에서 검출되는 신호의 세기는 다음과 같다.

$$I_s = k \cdot I_0 \cdot l \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) n_i \quad (1)$$

- 여기서, I₀ : 조사된 레이저광의 세기
- l : solid angle Ω를 갖는 collection optics과 레이저와의 거리
- n_i : 분자의 수밀도
- k : 보정 상수
- dσ/dΩ : differential scattering cross section

따라서 식(1)에 의하여 동일한 실험 조건에서는 산란 단면적(scattering cross section)이 검출되는 광신호 세기의 크기에 큰 영향을 준다. 입자 산란 측정을 제외한 분자 산란 방법에서 형광 신호 측정시 산란 단면적이 가장 크므로 신호의 검출이 용이하다. 이와 같은 레이저를 이용한 측정 기법으로는 수많은 종류가 제안되어 있으나, 연소 진단 목적에 실용적으로 적용할 수 있는 기법은 한정되어 있다. Table 1은 레이저를 이용하여 연소장에서 측정할 수 있는 물리적 정보를 나타낸다.

3-2. 레이저 유도형광법에 의한 농도 측정

형광(Fluorescence)은 원자, 분자 또는 라디칼의 에너지 준위가 들뜬상태(excited state)에서 바닥상태(ground state)로 전이되는 과정에서 광자를 방출하는 현상으로,

Table 1. Laser Diagnostics for Combustion and Non-combustion Fields

Information	Technique
LIF/LIPF	<ul style="list-style-type: none"> • OH, NO, O₂, C_nH_m, H₂, H₂O, etc • concentration • temperature • visualization of flame front
Tracer LIF	<ul style="list-style-type: none"> • spray injection • liquid/gas transition • air/fuel mixing • velocity
Raman scattering	<ul style="list-style-type: none"> • majority species concentrations • mixture fraction • temperature
Rayleigh scattering	<ul style="list-style-type: none"> • total gas density • temperature • visualization of shocks
Mie scattering	<ul style="list-style-type: none"> • particle distribution • flow velocity (PIV, PTV) • concentration

에너지 준위를 들뜬상태로 만들기 위해서는 가열, 화학 반응 또는 광자의 흡수 등 바닥상태의 분자에 적절한 에너지가 공급되어야 한다. 이때 레이저로부터 공급된 광자를 흡수하여 들뜬 분자가, 자발방출(spontaneous emission)의 과정을 통하여 광자를 방출하는 현상을 레이저 유도 형광법(LIF, Laser Induced Fluorescence)이라고 한다. 레이저 유도 형광은 레이저 분광법의 한 분야로 특히 원자 또는 분자의 농도 측정에 매우 효과적이며, 이때 LIF 신호의 세기는 들뜬상태 분자의 수 밀도(number density, population)에 비례하게 된다.

라디칼의 농도는 형광 신호로부터 얻을 수 있고 그에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$I_n = A_{nm} \cdot h \cdot v_{nm} \cdot (\Omega/4\pi) \cdot V \cdot N_m \quad (2)$$

- 여기서, n, m : quantum state
- I_n : 형광 신호 세기
- N_m : 여기 상태의 밀도
- A_{nm} : 임의 방출시 Einstein coefficient
- h : Planck's 상수
- v_{nm} : 방출된 빛의 주파수
- Ω : solid angle
- V : 측정 부피

LIF 신호의 정량적 측정을 위해서는 실험에 관한 요인과 분광학적 요인을 정확하게 검토해야만 한다. LIF 실험에 있어서 고려해야 할 실험적 요인으로는 측정 부피, solid angle, 필터의 측정 효율, monochromator,

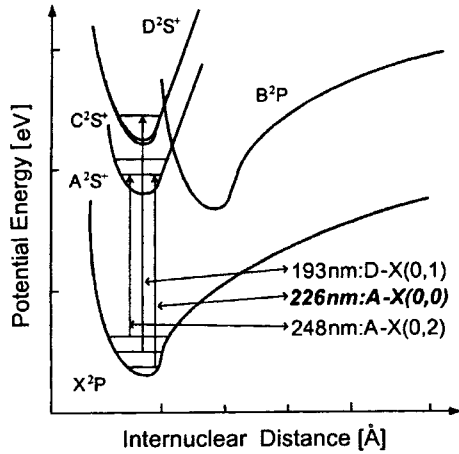


Fig. 1. Potential energy diagram of NO.

PMT(Photo Multiplier Tube) 및 camera의 측정 효율, 레이저의 파워 밀도, 분광학적 형태, 펄스 존재 시간 등이 있고 분광학적 요인으로는 천이 확률, 흡수 형태, 형광 신호 생산량 등이 있다.

LIF를 이용하여 NO 여기에 사용되는 여러 전이(transition)를 Fig. 1에 나타내었다. NO의 LIF 연구에 가장 광범위하게 사용된 NO 전이는 A-X(0, 0)^[4], D-X(0, 1)^[5], A-X(0, 2)^[6] 밴드이다. A-X(0, 0) 밴드는 226 nm 파장을 내도록 다이 레이저(dye laser)를 사용하여 여기시키는 반면, D-X(0, 1), A-X(0, 2)는 각각 193 nm에서 ArF 과 248 nm에서 KrF 엑시머 레이저를 여기원으로 사용할 수 있다.

NO의 기저 전자 준위(ground electronic state)는 X로 표시하고 여기 전자 준위는 Fig. 1과 같이 A, B, C, D, a, b, ... 등의 기호로 표시한다. 이 중에서 LIF 측정애 주로 쓰이는 전이(transition)는 X에서 A 또는 X에서 D로의 여기이다. 그 중에서 본 실험에서는 NO A-X(0, 0) 밴드를 사용하였다.

4. 실험 장치 및 방법

4-1. 버너 실험 장치

Fig. 2는 선화류를 동반한 화염에서의 생성되는 NO를 측정하기 위해 제작된 스윙버너이다. 실험에 사용된 이중 선화 연소기는 Fig. 3에서 보듯이 연료는 동축상의 직경 2 mm의 중심관으로 공급되고, 공기는 내측의 1차(Primary)와 외측의 2차(Secondary)로 나뉘어 공급되어 각각의 선화 날개를 통과하여 선화류를 생성한다. 내부의 선화각도는 30°이며 외부의 선화 각도는 45°로 고정되어 있다. 이에 대한 선화수 S는 각각 0.4, 0.6이다.

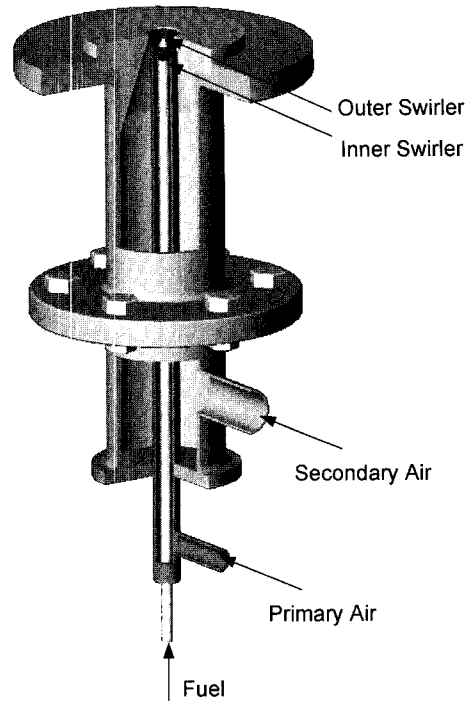


Fig. 2. Swirl burner configuration.

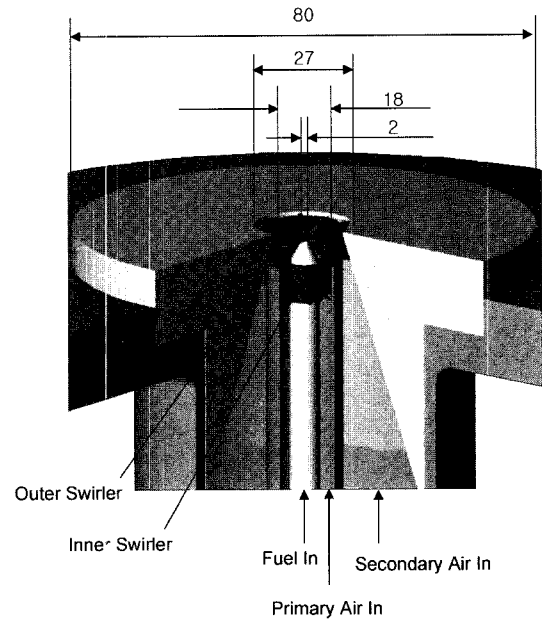


Fig. 3. Swirler configuration.

공기는 Blower에 의해서 공급되며 맥동을 줄이기 위한 탱크(Surge Tank)를 통과한 후 두 부분으로 나뉘어져 1

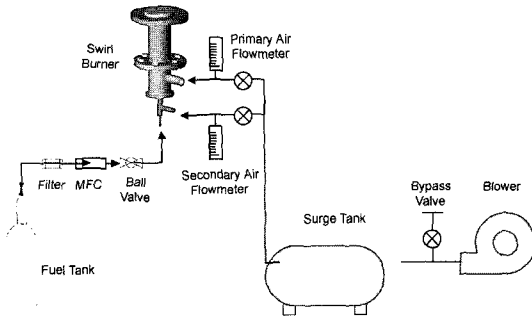


Fig. 4. Experimental setup for the swirl burner.

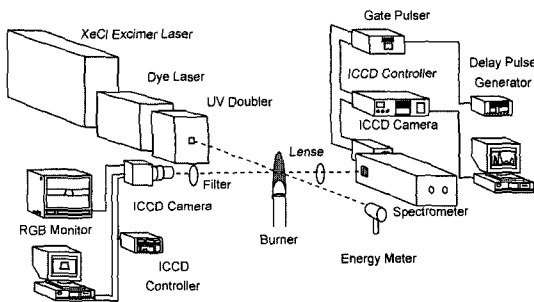


Fig. 5. Schematic diagram of experimental set-up for NO.

차, 2차 유로로 공급된다. 공기의 유량은 각각 오리피스 형 유량계로 조절된다. Fig. 4는 버너 실험을 위한 배관 구성도이다.

4-2. 광학 실험장치

본 연구에서 사용된 전체적인 광학 장치의 개략도는 Fig. 5와 같다. 본 실험에서 사용된 여기 광원은 XeCl 엑시머 레이저(Model No. COMpex 205, Lambda Physik)를 펌핑원으로 하는 다이 레이저(Lambda Physik, SCANmate 2)이며, 엑시머 레이저의 에너지를 200 mJ 정도로 일정하게 유지하도록 하였으며, 펄스 간극은 308 nm에서 20 ns이다. 다이 레이저는 다른 레이저로 펌핑하면 우수한 특성을 얻을 수 있는데, 대표적인 펌핑 레이저로는 Nd:YAG 레이저, 아르곤 이온 레이저, 엑시머 레이저 등이 있으며, 많은 레이저가 파장이 극히 조급밖에 변할 수 없는 것에 비해 다이 레이저는 적절한 색소를 선정할 경우 원하는 범위에서의 가변파장의 레이저빔을 얻을 수 있어서 LIF에 널리 쓰인다.

NO A-X(0, 0)의 파장을 발생시키기 위하여, 엑시머 레이저에서 나오는 308 nm의 빔을 Courmarin 2를 사용한 다이레이저를 통하여 452 nm의 파장을 얻는다. 여기서 나온 파장은 UV Doubler의 BBO(Beta Barium Borate)

Crystal를 통하여 226 nm의 빔으로 변환시킨다. 이빔은 버너 중앙에 평행하게 지나가도록 하였으며 225.9 nm에서 1.5 mJ/pulse의 강도를 갖는다. 형광 신호는 두 개의 ICCD 카메라에 초점을 맞추었다 한쪽은 spherical 렌즈(f=100 mm)로 300 grooves/mm 그레이팅으로 작동하는 ICCD 카메라(PI, ITEA/CCD-1152EK)가 장착된 이미징 스펙트로미터(Acton, SpectroPro-500i)에 맞추어 230~310 nm에서 방출 스펙트럼을 기록하였다. 스펙트럼 분석에 사용된 ICCD 카메라는 한 개의 MCP가 부착된 증폭기가 CCD와 광파이버(optical fiber)고 결합되어 있으며, 화소수는 1152x298이다. ICCD용 펄스 생성기는 같은 회사의 PG-200이며, Detector 제어기는 ST-138이다. 또한 실제 화염내 농도분포를 측정하기 위하여 동시에 같은 신호를 PI사의 ICCD 카메라(16-bit)를 사용하였으며, CCD의 화소수는 576x384이다. 카메라 게이트 폭은 300 ns로 설정하였다. 광학 필터로 UG-5 Schott Glass 필터(두께 2 mm)를 사용하여 얻고자 하는 파장대 이외의 신호를 제거하였다. 모든 LIF 라인은 20회씩 누적하였으며, 레이저와 ICCD 카메라의 신호 동기용 master로는 디지털 펄스 생성기(SRS, Model : DG-535)를 사용하였다.

5. 보정기법

본 실험에서는 LIF에 의한 정량적인 NO를 측정하기 위하여 Thomsen^[7] 등이 사용한 보정기법을 적용하였다. 실험에서는 N₂에 NO가 1909 ppm 밸런스된 가스를 사용하였다. 자연생성된(undoped) NO의 양은 이들 첨가에 의한 상대적인 비에 따라 결정된다. 이를 위하여 몇가지 가정을 만족하여야 하는데 첫째, 첨가된 NO는 연소장에 영향을 미치지 않으며, 둘째, 첨가된 NO는 화염에서 분해되지 않는다는 것이다. 또한 셋째, 레이저에 의한 on-line, off-line의 배경신호(background signal)는 일정해야 한다.

NO의 정량적 측정을 위해서 화염에 알고 있는 양의 NO를 몇단계로 첨가하는 것이다. 첨가된 NO와 나타난 LIF 신호로부터 NO 농도에 따른 LIF 신호를 나타내는 보정 기울기를 얻을 수 있다. 우선 on-line과 off-line의 여기 파장을 사용하여 화염에 NO의 양을 몇단계로 첨가시켜 보정 곡선을 얻는다. Fig. 6는 on-line과 off-line 여기 파장에 각각 NO를 0, 67, 105, 143, 181 ppm씩 첨가하여 얻은 곡선이다. 만약 두 개의 보정 곡선의 기울기 mon과 moff를 알면 첨가한 곡선에서의 on-line, off-line 신호는 다음과 같다.

$$S_{off} = m_{off} X_{NO} + C_b \tag{3}$$

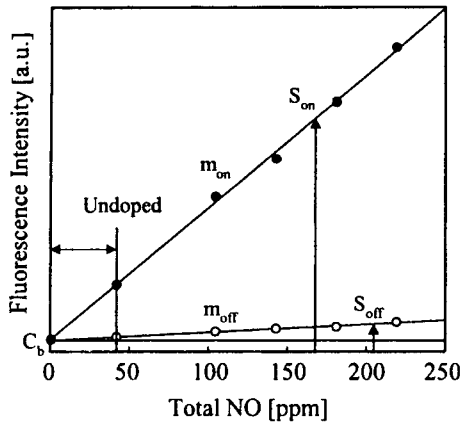


Fig. 6. Sample calibration curve for LIF measurements of NO.

$$S_{on} = m_{on} X_{NO} + C_b \quad (4)$$

여기서 X_{NO} 는 첨가(doped)와 자연생성(undoped) NO의 총 농도이다. 식(3)과 (4)에서 자연생성된 경우 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{on_u} = m_{on} X_{NO_u} + C_b \quad (5)$$

$$S_{off_u} = m_{off} X_{NO_u} + C_b \quad (6)$$

두식을 정리해 보면 최종적으로 생성된 NO 농도를 구할 수 있다.

$$X_{NO_u} = \frac{S_{on_u} - S_{off_u}}{m_{on} - m_{off}} \quad (7)$$

6. 결과 및 고찰

6-1. NO A-X(0, 0) 밴드내 여기 라인 선정

NO의 LIF 측정에서 여기 라인을 선정할때는 고려해야 할 점들이 있다.

Schumann-Runge O_2 밴드가 NO의 A-X(0, 0) 밴드에 겹쳐 나타난다는 것이다. 이것은 NO의 A-X(0, 0) 밴드의 여기를 어렵게 만든다⁸⁾. 그러므로 NO 여기라인 선정은 O_2 와 다른 간섭등을 최소화 할 수 있도록 주의 깊게 선택해야 한다. 게다가 여기 전이(transition)는 다른 라인들과 분리되어 있고 볼츠만 분포에 따라 온도에 상대적으로 덜 민감해야 하며, 전이는 충분한 신호 강도(S/N비)를 나타낼 수 있어야 한다.

Fig. 7에 적절한 NO 여기라인으로 $R_{21}+Q_1(14.5)/R_{12}+Q_2(20.5)/P_1(23.5)$ 을 선정하여 나타내었으며, 이 라인은 Battle⁹⁾ 등에 의해 제안된 라인과 일치한다. 또한 O_2 에 의한 간섭이 첨두 NO 신호와 비교해 작음을 알 수 있

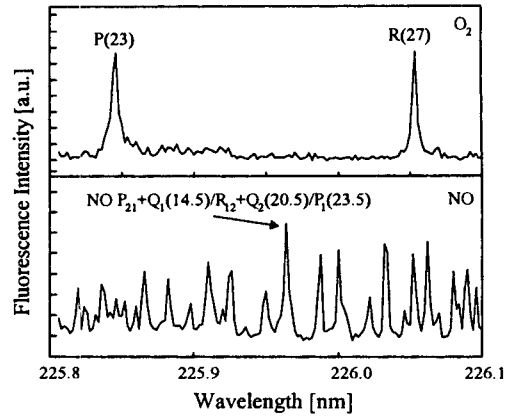


Fig. 7. Excitation spectrum of NO and O_2 in pre-mixed $CH_4/O_2/N_2$ flame for equivalence ratios of 0.9.

다. 그러므로 대기압에서 LIF 신호에 대한 이들 간섭의 영향도 마찬가지로 작을 것이다.

6-2. Off-Line 선정

적절한 off-line 여기 파장의 선택은 다른 배경신호의 보정을 위해서 필수적이다. 그와 같은 라인을 선정하기 위하여 여기파장내 on-line 파장과 같은 배경신호를 갖는 off-line 지역을 찾는 것이다. 이를 위해 첫째, 대기압 $CH_4/O_2/N_2$ 화염에서 여기 라인 스캔(Scan)을 하였다. 둘째, 적절한 off-line 지역을 선택하여, NO 스펙트럼에서의 골(Valley)에 해당하는 곳을 선정한다. 본 실험에서 NO 스펙트럼에서 가장 작은 강도를 나타내는 225.975 nm로 정하였다. Fig. 8에 225.94~225.96 nm 범위에서의 스펙트럼을 표시하였다.

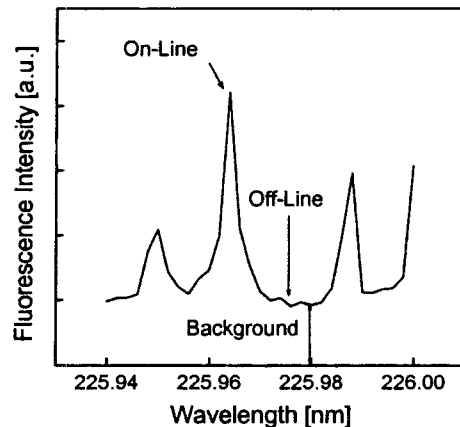


Fig. 8. Method for Subtracting off Background Signal by Tuning away from the NO Peak Wavelength.

6-3. 이중선회 확산화염내 NO 농도분포

Fig. 9~Fig. 13은 연료를 4 slpm, 2차공기는 200 slpm으로 고정하고 1차공기를 변화시켜 공기비 $\Phi(=Q_1/Q_2)$ 를 case1은 $\Phi=0.25$, case2는 $\Phi=0.3$, case3는 $\Phi=0.35$, case4는 $\Phi=0.4$ 의 4단계로 하였을 때, 화염 내부의 축방향 거리에 따른 NO의 분포를 나타낸 것이다. 축방향으로 거리가 증가할수록 중앙 부근의 NO 농도는 증가하다가 점차로 감소하며, 30 mm 이후 부터는 일정한 분포를 보이면서 점차로 낮아지고 있다.

전체적으로 1차/2차 공기비(Air Ratio)가 클수록 화염 상류의 NO 농도가 높아지고, 화염 후류에서는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 공기비가 커질수록 화

염의 길이가 짧아지기 때문이다. Fig. 9에서 알수 있듯이 축방향 길이가 짧아 질수록 중앙 부분의 농도 분포의 농도 분포의 차이가 커짐을 나타내고 있다. 또한 Fig. 11에서와 같이 축방향의 길이 Z=30 mm 이후의 경우에는 중간영역에서 전체적으로 비슷한 농도분포를 보이고 있다. 모든 경우에 대해서 20 ppm을 넘지 않는 낮은 농도를 나타내고 있다.

예혼합 화염과 비교하여 전체적으로 화염의 길이가 짧아지는 이점이 있으므로 연소장치의 설계시 크기를 소형화하는데 효과적일 것으로 판단된다. 또한, 본 실험에 사용한 이중선회에 의한 연소기는 연소장치에 재순환 영역의 존재로 비교적 안정된 화염과 고부하 연소를 가능

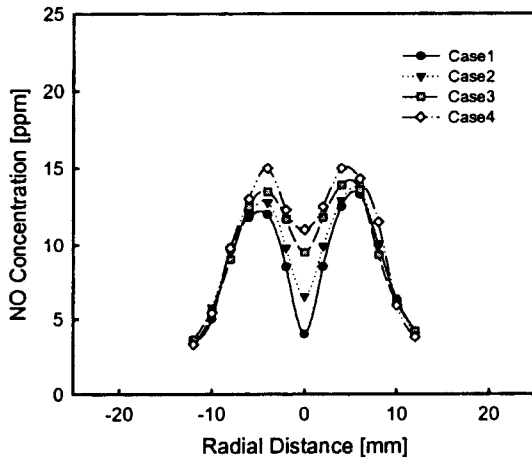


Fig. 9. NO Concentration along radial direction at Z=10 mm.

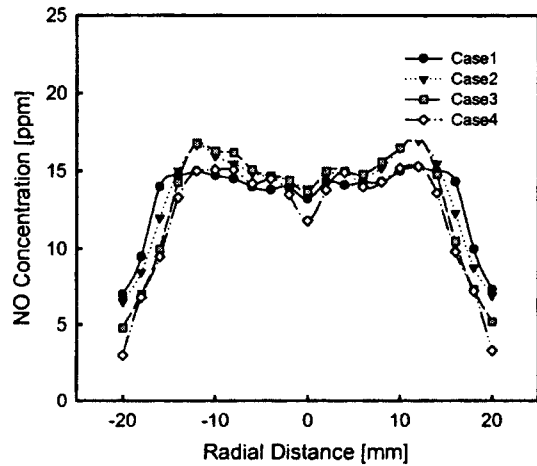


Fig. 11. NO Concentration along radial direction at Z=30 mm.

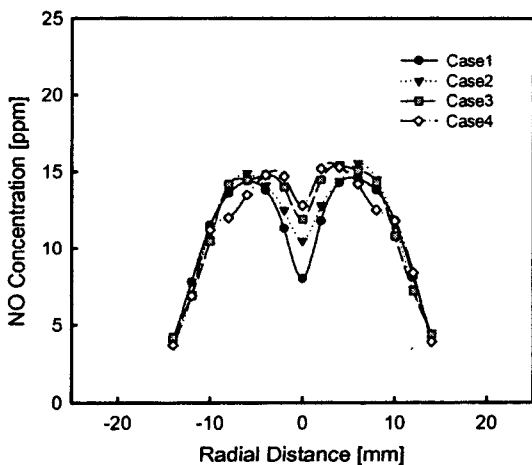


Fig. 10. NO Concentration along radial direction at Z=15 mm.

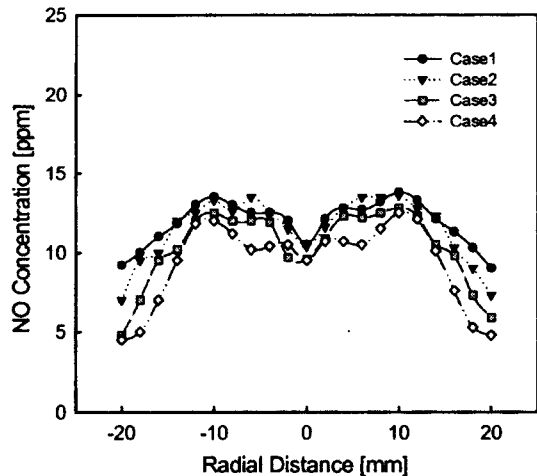


Fig. 12. NO Concentration along radial direction at Z=45 mm.

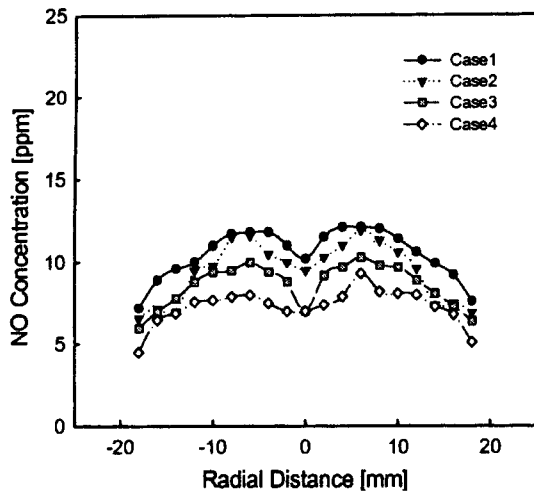


Fig. 13. NO Concentration along radial direction at $Z=60$ mm.

하게 하는 등의 많은 이점이 있다.

7. 결 론

본 실험에서는 XeCl Excimer pumped Dye Laser와 두 개의 ICCD 카메라를 이용하고 A-X(0, 0)에 226 nm에서 LIF법을 사용하여 이중선회 연소기인 스월버너의 NO 농도를 정량적으로 구하였다. 이를 위하여 O_2 와 같은 다른 간섭신호를 최소화하기 시킬 수 있는 적절한 여기라인을 선정하였으며, 측정된 NO의 형광신호로부터 농도 분포를 얻을 수 있었다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- NO의 정량적 측정을 위한 여기라인 선정을 위하여 NO와 O_2 의 여기 스펙트럼을 동시에 측정하였으며, $P_{21}+Q_1(14.5)/R_{12}+Q_2(20.5)/P_1(23.5)$ 전이를 여기라인으로 사용하므로써 다른 간섭으로 인한 영향을 최소화 시킬 수 있었다.

- 스월버너를 이용한 실험에서는 축방향 거리가 증가할수록 중앙 부근의 NO 농도는 감소하며, 30 mm 이후부터는 일정한 분포를 보이면서 점차로 낮아지고 있다.

- 전체적으로 1차/2차 공기비(Air Ratio)가 클수록 화염의 길이가 짧아져서 화염 상류의 NO 농도가 높아지고, 화염 후류에서는 NO 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지·자원 기술 개발 사업의 지원으로 이루어진 것이며, 공동연구의 생산기술 연구원, 김경수 박사, 진성호 박사 및 김성욱군에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Eckbreth, A.C.: Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species, Abacus Press, Kent, UK (1996).
2. 김경호: 최신 대기청정기술 질소산화물(NO_x) 배출 저감기술, 산업기술정보원 (1997).
3. Demtröder, W.: Laser Spectroscopy : Basic Concepts and Instrumentation, Springer-Verlag, Heidelberg (1981).
4. Chou, M., Dean, A.M. and Stern, D.: Laser-Induced Fluorescence Measurements of NO in NH_3/O_2 and CH_4 /Air Flames, Journal of Chemical Physics, 78(10), 5962 (1996).
5. Honig, R., Kappler, G., Andersen, P. and Brehm, N.: Multi Species Detection in an Liquid Fueled Model Combustor using Tunable Excimer Lasers, Combustion Science and Technology, 102, 255 (1994).
6. Wodtke, A.M., Huwel, L., Schluter, H., Meijer, G., Andersen, P. and Voges, H.: High Sensitivity Detection of NO in a Flame Using a Tunable ArF Laser, Optics Letters, 13, 910 (1988).
7. Thomsen, D.D., Kuligowski, F.F. and Laurendeau, N.M.: Background Corrections for Laser-Induced Fluorescence Measurements of Nitric Oxide in Lean High-Pressure, Premixed Methane Flames, Applied Optics, 36(15), 3244 (1997).
8. Wysong, I.J., Jeffries, J.B. and Crosley, D.R.: Laser-Induced Fluorescence of $O(3p^3P)$, O_2 , and NO near 226 nm : Photolytic Interferences and Simultaneous Excitation in Flames, Optics Letters, 14(15), 767 (1989).
9. Battles, B.E. and Hanson, R.K.: Laser-Induced Fluorescence Measurements of NO and OH Mole Fraction in Fuel-Lean, High-Pressure (1~10 atm) Methane Flames : Fluorescence Modeling and Experimental Validation, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 54(3), 521 (1995).