

KrF 레이저를 이용한 희박연소화염과 매연화염에서의 NO 계측

손성민 · 이종재* · 고동섭†

목원대학교 광·전자물리학과, *전자 및 컴퓨터공학과

☎ 302-729 대전광역시 서구 도안동 800번지

오승묵 · 강건용

한국기계연구원 열유체환경연구부

☎ 305-343 대전광역시 유성구 장동 171번지

김종욱

성균관대학교 금속재료공학부 플라즈마응용표면기술연구센터

☎ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300번지

(2001년 1월 29일 받음, 2001년 5월 22일 수정본 받음)

KrF 레이저를 여기광원으로 사용하여, 희박연소화염과 매연화염에서 각각 청색편이된 NO 형광 신호를 측정하였다. 두 화염에 대해서 여기광의 세기와 NO 첨가량에 따른 NO 신호와 배경잡음의 세기를 각각 계측하고 그 결과를 정성적으로 분석하였다. 또한 희박연소화염에서 위치에 따른 NO 신호의 세기도 관측하였다.

분류코드 : SP010.

I. 서 론

연소과정에서 생성, 배출되는 여러 종류의 화학물질은 지구 환경을 오염시키는 주요 요인의 하나로 밝혀지고 있으며, 이와같은 연소생성물의 발생기작을 근본적으로 이해하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특별히 물리·화학적으로 빠르고 복잡한 반응 과정을 수반하는 연소 연구에서, 레이저 분광학은 유용한 도구로써 이미 널리 사용되고 있다.^[1-3]

본 연구는 가시화 엔진에서의 OH 라디칼(radical)에 대한 계측 연구^[4]에 이어서, NO 라디칼에 대해 초점을 맞추어 진행되었다. 현재까지 화염내에서의 NO 연구^[5-18]가 많이 수행되었지만, OH에 비해서 NO 특성은 상대적으로 충분히 이해되지 못하고 있다. 특히 희박연소화염(lean-burn flame) 발생 조건에서 가동되고 있는 엔진이라도 부분적으로 매연화염(soot flame)이 발생할 수 있다. 따라서 가시화 엔진에서의 계측 결과를 보다 정확히 분석하고 이해하기 위해서는 두 화염에서 발생하는 NO 신호의 특성을 상호 비교할 근거가 필요하다. 그러나 그동안 발표된 NO의 연구는 대부분 희박연소화염에서 이루어져 왔으며, 지금까지 조사한 범위에서는, 두 화염을 동시에 비교 실험한 결과를 찾지 못하였다.

NO 형광 신호는 색소 레이저의 2차 조화파(226 nm) 또는 ArF 레이저(193 nm)를 사용하여 계측할 수 있는데,^[15-16] 형광 발생 효율이 좋은 반면에 이와같은 단파장의 레이저광은 화염 내에서 산란에 의한 광손실이 크고, 적색편이된 NO 형광을

계측하므로써 배경잡음이 큰 것이 단점으로 지적되고 있다. 반면에 247.9 nm의 KrF 레이저광을 사용하는 경우, 청색편이된 NO 신호를 계측하므로, 계측효율은 감소하지만 배경잡음과 산란현상이 상대적으로 적게 발생하기 때문에 엔진연소의 가시화에서 유용하다.^[14] 본 실험에서는 여기광원으로 KrF 레이저를 사용하였다.

II. 실험

본 실험에서 사용한 계측장치의 개략도를 그림 1에 정리하였다. 여기서 사용한 엑시머 레이저(LPX150, Lambda Physik)는 10~20 ns의 펄스폭을 가지고 있으며, 최대출력은 약 380 mJ/pulse이다. 레이저광은 렌즈를 통해 화염의 정해진 공간에 집중된다. 레이저 운용 컴퓨터에서 격발 신호가 발생하면, 일정 시간 지연 후 레이저광이 발진한다. 컴퓨터 격발 신호는 delay/pulse 발생기(PG-200, Princeton Instruments)와 ICCD controller(ST-138, Princeton Instruments)를 거쳐서 ICCD 카메라(576LDG/1, Princeton Instruments)를 게이팅(gating)하게 된다. 이때 ICCD 카메라의 게이팅 시간과 폭은 신호대 잡음비와 밀접한 관계가 있다. 본 실험에서는 지연시간을 2610 ns, 게이팅폭을 100 ns로 하였을 때 좋은 신호대 잡음비를 얻을 수 있었다.

레이저 유도 형광 스펙트럼은 분광계(Spectropro-275, Acton Research Corporation)를 거쳐서 ICCD 카메라에 결상되며, 그 데이터는 다른 컴퓨터로 전송된다. 컴퓨터 운영 프로그램을 사용하여 파장에 따른 빛의 세기를 산출하고 저장한다. 또한 적

†E-mail: dsko@mokwon.ac.kr

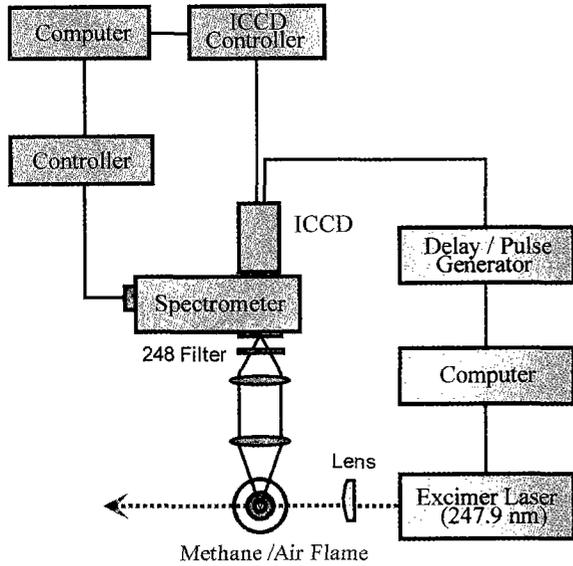


그림 1. 실험 장치의 개략도.

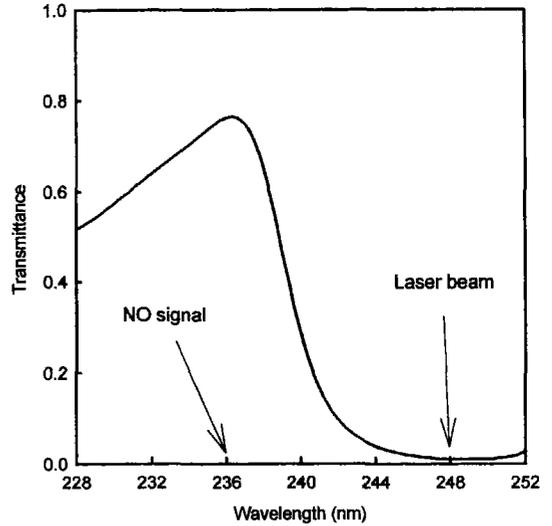


그림 3. 본 실험에서 사용한 248 nm 필터의 투과곡선.

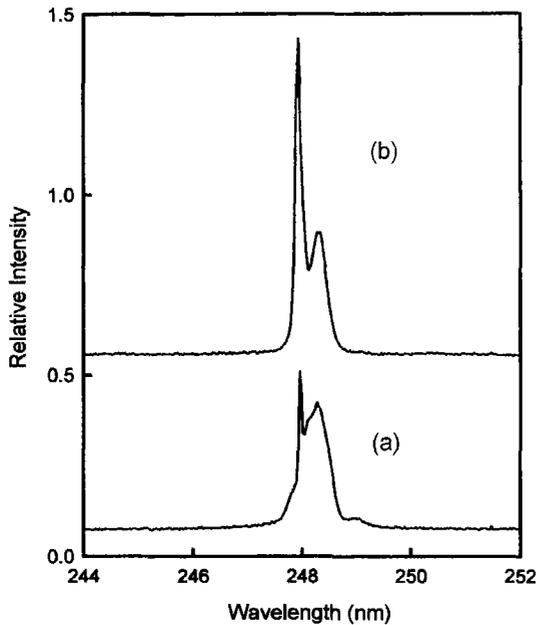


그림 2. 발진파장을 247.9 nm에 잠금했을 때의 레이저광 스펙트럼.

분회수를 정할 수 있어서, 미약한 신호인 경우, 적분회수를 증가시켜 신호대 잡음비를 향상시킬 수 있다. 본 실험에서는 적분회수를 500으로 하여 계측하였다.

NO의 A-X (0,2) 흡수 파장은 247.9 nm이지만, 이 파장은 엑시머 레이저의 발진 파장대 가장자리에 위치하고 있어서 발진 상태가 불안정하다. 주어진 파장에서 발진 이득이 낮은 경우 레이저 출력경의 반사율을 높이면 발진 효율을 향상시킬 수 있다. 본 실험에서는 반사율이 10%인 seed 레이저의 출력경을 20% 평면거울로 교체하였다. 반사율이 10%인 거울과 비교하여 레이저 출력은 감소하지만 NO 흡수선 파장의 발진 안정성은 다소 향상된 것으로 평가하였다.

레이저 정렬이 최적인 상태에서 레이저 발진 스펙트럼을 계측하여 그림 2에 정리하여 놓았다. 비교적 안정된 상태에서 발진하고 있으나, 247.9 nm의 세기가 시간에 따라 다소 변화하는 것이 관측되었으며, 그림 (a)와 (b)는 각각 그 예를 보여주고 있다. 곡선 (a)에 비해서 곡선 (b)에서는 247.9 nm의 세기가 증가하였기 때문에, 상대적으로 발진 및 주파수 잠금 효율이 좋은 경우로 판단된다.

화염에서 산란된 레이저광이 분광계로 바로 입사하면, 분광계에 있는 광부품 및 공기로부터 잡음 형광이 발생하여 광검출기로 입사하기 때문에 이를 최소화하기 위해서 248 nm 필터를 분광계 입구에 설치하였다. 이 필터의 투과곡선은 그림 3과 같다. 248 nm 근처에서 투과율이 최소화되며, 계속 파장인 236 nm 근처에서는 최대 투과율을 가지고 있어서 실험에 적합하다고 평가하였다.

그림 4는 NO의 에너지 곡선을 보여 주고 있다.^[19] 바닥상태는 X^2II 이며, N-O의 결합에너지는 약 6.496 eV이고, 이에 대응하는 빛의 파장은 190.8 nm이다. 바닥상태에 있는 진동에너지 준위는 v'' 으로, $A^2\Sigma^+$ 준위에 있는 진동에너지 준위는 v' 으로 나타내었다. 225~226 nm의 색소 레이저에 의해서는 A-X (0,0) 여기가 이루어지며, 193 nm의 ArF 레이저로는 D-X (0,1) 여기가 가능하다. 한편 247.9 nm의 KrF 레이저로는 A-X (0,2) 전이가 이루어진다.

A-X (0,0), A-X (0,1), A-X (0,2) 형광 전이선은 각각 226, 236, 248 nm 근처에 위치하고 있으며, A-X (0,3)는 260 nm, A-X (0,4)는 272 nm 근처에 위치하고 있다.^[5] 그림 5는 분석 프로그램 LIFBASE^[20]를 이용하여, 1기압, 1000 K의 온도에서 구한 NO의 A-X (0,0)와 A-X (0,1) 형광 스펙트럼이다.

볼츠만 통계에 의해서 알 수 있는 바와같이, 상온에서는 바닥상태에서 $v''=2$ 의 점유밀도는 매우 낮기 때문에 KrF 레이저로 NO 신호를 계측하는 것은 용이하지 않다. 그러나 고온, 고압 상태에서는 온도 재분포와 분자 충돌에 의해서 $v''=2$ 의 점유 밀도가 증가하기 때문에 NO 신호를 계측할 수 있는 환

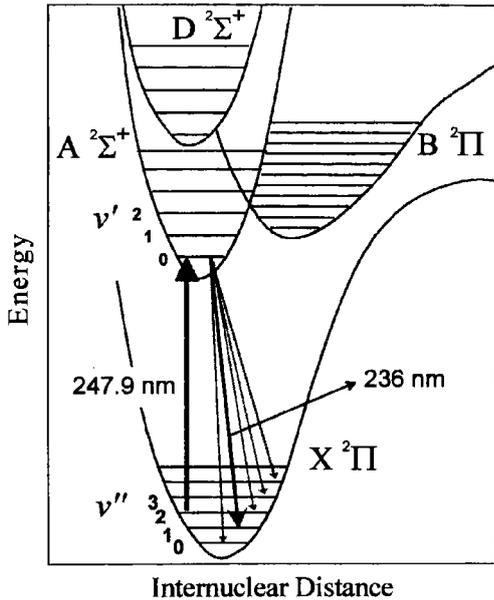


그림 4. KrF 레이저를 사용한 여기 과정 및 형광 전이 과정.

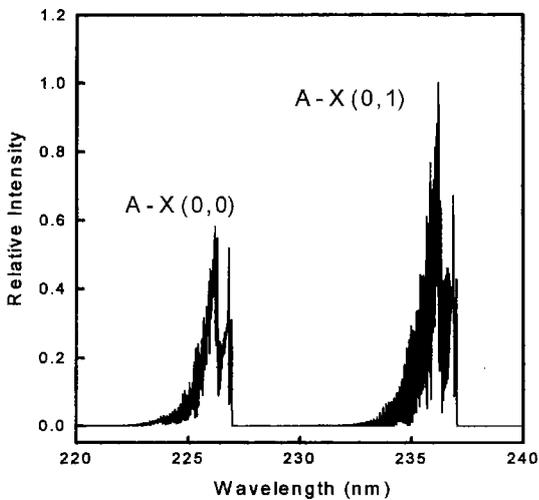


그림 5. NO 분자의 A-X (0,0)와 A-X (0,1) 형광 스펙트럼.

경이 된다. A-X (0,2) 신호는 여기광과 중첩되어 있기 때문에 계측이 불가능하고, A-X (0,0) 신호는 상대적으로 약하기 때문에 본 실험에서는 파장이 236 nm 근처에 있는 A-X (0,1) 신호를 수집하였다.

III. 실험결과 및 분석

본 실험에서 사용한 버너 노즐의 내경은 3.4 mm, 외경은 7.7 mm이다. 버너의 직경은 85 mm, 높이는 115 mm이다. 노즐로부터 25 mm 높이의 화염중심영역을 계측공간으로 하였다. 열전대 온도계(AT3-R, Hanyoung)를 사용하여 계측공간의 온도를 측정하였으며, 매연화염인 경우 1194 ± 101 K, 희박연소화염에서는 1503 ± 117 K이었다. 메탄, 연료혼합공기, 그리고 가려막기(shielding) 공기의 유량을 조절할 수 있는 유량계를

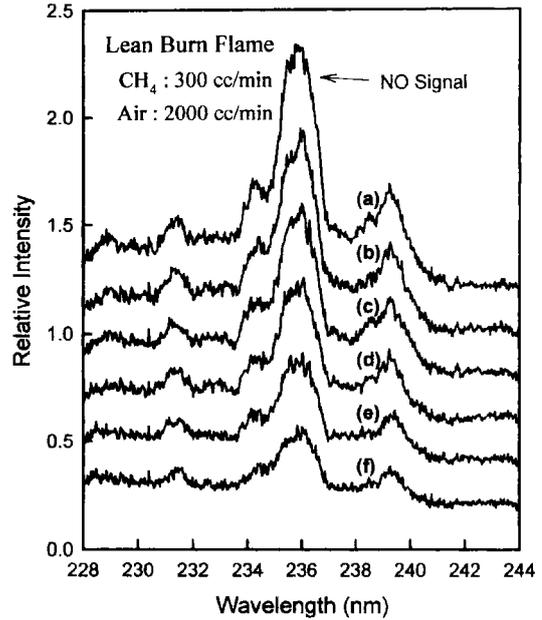


그림 6. 희박연소 조건에서, 여기광 세기에 따른 계측한 NO의 스펙트럼. (a) 350, (b) 300, (c) 250, (d) 200, (e) 150, (f) 100 mJ/pulse.

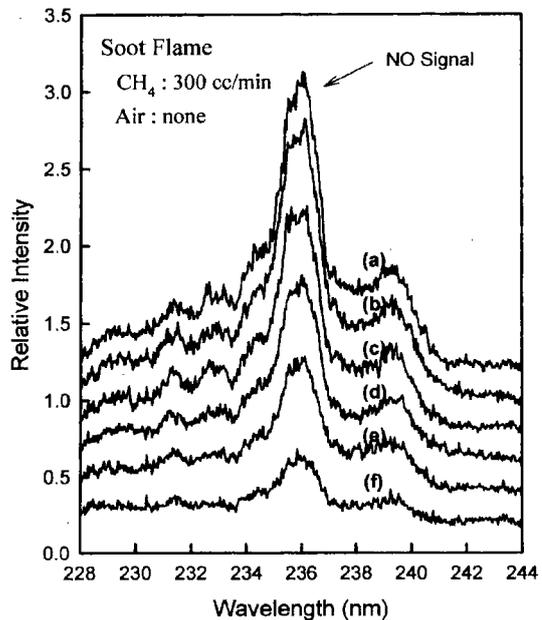


그림 7. 매연화염에 대해 여기광 세기에 따른 계측한 NO의 스펙트럼. (a) 350, (b) 300, (c) 250, (d) 200, (e) 150, (f) 100 mJ/pulse.

사용하였다.

그림 6과 7은 각각 희박연소화염과 매연화염에 대해 레이저 출력을 변화시키면서 계측한 결과를 보여주고 있다. 각 그림에서 곡선 사이의 변화를 보여주기 위해 기준점을 올려서 나타내었으며, 아래에서 위로 올라갈수록 레이저 출력을 증가시켜 계측한 결과이다. 희박연소화염은 메탄 300 cc/min, 연료혼

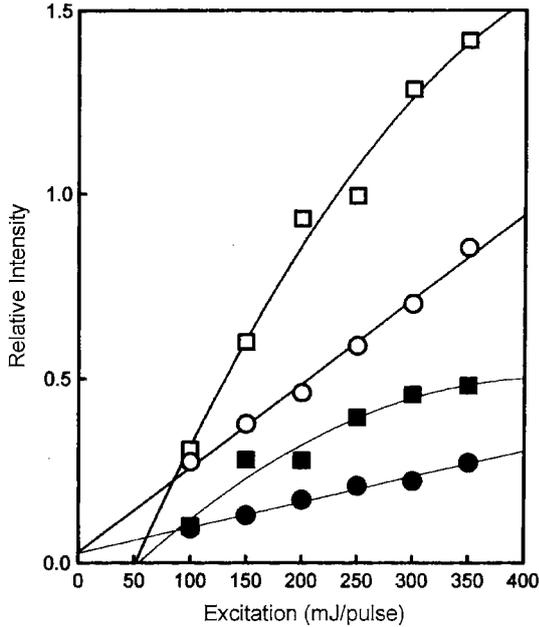


그림 8. 매연화염에서의 NO 형광(□) 및 배경잡음(■) 세기와 희박연소조건에서 계측한 NO 형광(○) 및 배경잡음(●)의 세기.

합공기 2000 cc/min, 그리고 가려막기 공기의 유량을 45 L/min로 한 연소조건에서 계측하였다. 메탄의 유량은 유지하고 연료혼합공기만을 차단하면 적색 화염을 관측할 수 있는데, 여기서 이 화염을 매연화염이라고 하였다.

초점거리가 50 cm인 원통렌즈를 사용하여 레이저빔을 화염의 z-방향과 나란한 방향으로 집속시켰다. 두 개의 볼록렌즈로 구성된 광학계를 이용하여 화염중심의 영상이 분광계의 슬릿에 결상되도록 정렬을 하여, 화염중심의 신호만 검출되도록 하였다. 레이저 출력은 광펄스당 100~350 mJ 범위에서 50 mJ 간격으로 변화시키면서 측정하였다.

그림 6과 7에서 각각 236 nm 근처에 위치한 NO 형광 신호를 볼 수 있으며, 231.5 nm와 239.5 nm 근처에서도 세기가 약한 봉우리 신호가 발생하는데, 이것은 탄소 신호로 추측하고 있다.^[17,21] 장파장쪽으로 단순 증가하는 배경잡음이 발생하지만, 분광계 입구에 설치한 248 nm 필터의 투과특성(그림 3 참조)에 의해서 파장이 239 nm 이상인 구간에서는 신호가 감소하는 것처럼 나타난다. 배경잡음은 희박연소화염보다 매연화염에서 많이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이 배경신호는 주로 레이저광과 매연입자간 상호작용에 의한 흑체 열복사선으로 확인이 되었다. 따라서 매연입자가 다량 함유된 매연화염에서 배경잡음이 강하게 나타나고 있다.

그림 8은 두 화염에서 계측한 NO 형광 신호와 배경잡음의 세기를 각각 정리한 것이다. NO 형광과 배경잡음은 레이저광의 세기가 증가함에 따라 두 화염에서 각각 증가하고 있으나, 그 경향은 다소 서로 다르게 나타나고 있다. 곡선마춤 결과, 희박연소화염에서는 직선이 원점을 지나가는 반면에, 매연화염에서는 여기광 세기가 약 50 mJ/pulse 이하에서는 NO 신호가 검출되지 않는 것으로 나타나고 있다. 따라서 매연화염

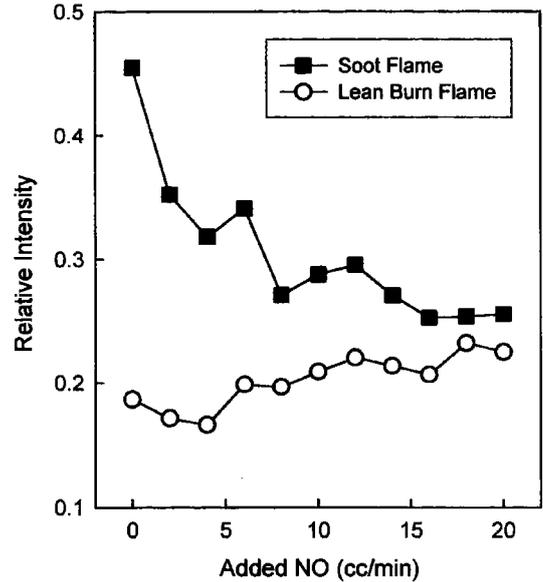


그림 9. NO 첨가량에 따른 배경잡음의 세기.

에서는 발생 위치에서 형광의 일부가 흡수되는 것으로 이해할 수 있다.

희박연소조건에서는 레이저광 세기와 신호 사이의 선형성이 있는 반면에, 매연화염에서는 다소 포화되는 경향을 보이고 있다. 여기 에너지가 150~350 mJ/pulse 사이에서 희박연소화염보다 매연화염에서 NO 신호의 크기가 약 1.4~2배 정도 높기 때문에 희박연소화염보다 매연화염에서 NO가 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

연소장 위치뿐만이 아니라 당량비, 압력에 따라서 NO의 농도는 서로 다르다.^[8-9,17-18] 메탄 화염인 경우, 당량비가 2.9~10.0으로 변화할 때 최대 NO 농도는 약 17~29 ppm으로 증가하며,^[8] 압력이 증가함에 따라서 NO 농도가 증가^[18]하는 것으로 알려져 있다. 한편 CH₄/H₂/N₂ 제트 확산화염의 NO 농도는 50~150 ppm을 나타내고 있다.^[9]

다음은 NO 분자를 첨가하면서 실험을 실시하였다. 질소와 NO를 8:2로 혼합하여 별도의 유량계를 거쳐서 연료공급관으로 공급하였다. 메탄 유량은 300 cc/min, 가려막기 공기의 유량은 45 L/min, 레이저 출력은 260 mJ/pulse인 계측 환경에서, 희박연소화염인 경우는 연료혼합공기 유량을 2000 cc/min으로 하였고, 매연화염인 경우는 연료혼합공기를 차단하고 계측하였다. 첨가된 NO는 0~20 cc/min 사이에서 유량을 변화시키면서 계측하였다.

그림 9는 배경잡음의 세기의 변화를 보여주고 있다. 매연화염에서는 NO를 첨가함에 따라서 배경잡음의 세기가 감소하고 있다. 따라서 NO를 첨가하므로써 흑체 열복사선의 세기가 감소하는 것을 가정할 수 있으며, 그 원인으로는 첨가된 NO가 매연 입자를 분해하거나 그 성질을 변화시켜서, 흑체 복사에 관여하는 입자의 농도가 감소한 것으로 볼 수 있다. 반면에 희박연소화염에서는 배경잡음의 세기가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있어서, 첨가된 NO가 화염의 완전연소 조건을 방해하는 것으로 이해하고 있으며, 실제로 NO의 유량이 증가함에

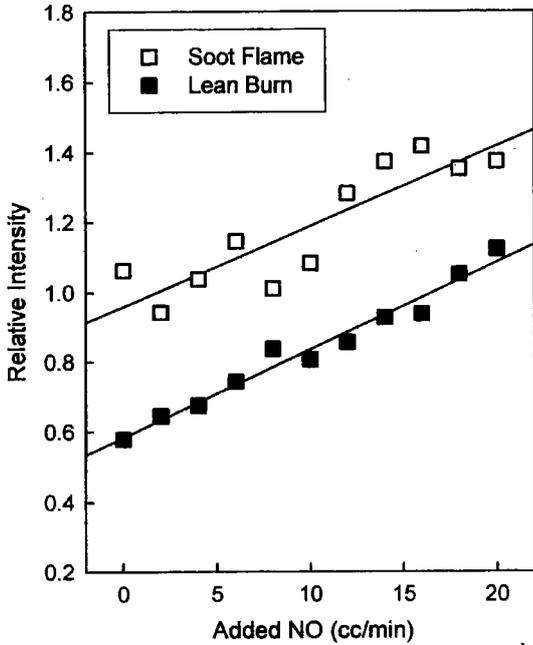


그림 10. NO 첨가량에 따른 NO 신호의 세기.

따라서 화염의 색깔이 다소 변화하는 것을 눈으로 관측할 수 있었다. NO는 화학성이 강하므로 화염내에 있는 여러 가지 물질과의 화학반응을 동반하며, 그 결과 연소상태를 변질시킬 수 있다.^{9,11)}

그림 10은 NO 첨가량에 따른 NO 형광 세기의 변화를 보여주고 있다. 매연화염에서 데이터의 분산이 상대적으로 큰 것을 제외하고는 두 화염에 대해 NO의 농도와 NO 형광 신호의 세기가 비례하므로 정량적인 NO 농도 측정을 위해서 본 시스템이 사용될 수 있음을 알 수 있다.

첨가된 NO가 10 cc/min일 때, NO의 농도는 희박연소화염에서 870 ppm, 매연화염에서는 6450 ppm이다. NO 농도에 따른 측정감도는 희박연소화염에서는 2.9×10^{-4} intensities/ppm, 매연화염에서는 3.7×10^{-5} intensities/ppm이었다.

화염의 반경 방향의 위치에 따른 NO 신호의 상대적인 세기를 측정하여, 그림 11에 정리하였다. 여기서는 희박연소화염만을 대상으로 측정하였다. 매탄은 300 cc/min, 혼합공기유량은 2000 cc/min, 그리고 가려막기 공기의 유량은 45 L/min, 레이저 출력은 260 mJ/pulse인 환경하에서 측정하였다. 화염의 크기는 렌즈에 의해 분광계 입구에 결상된 화염의 영상으로부터 그 크기를 추측하였다. 그러나 실제 화염의 경계면을 정의하는 것은 어렵다. 화염 내부는 예혼합 화염의 전형적인 특징이 나타나고 있으나, 경계면에서는 부분적으로 확산화염의 형태가 나타나기 때문이다. 여기서는 눈으로 확인되는 화염의 밝기를 기준으로 그 크기를 정의했으며, 영역을 그림 11에서 회색면으로 표시하였다.

화염의 중앙에서 큰 신호를 나타내고 있으며, 비교적 화염 경계면으로 갈수록 신호의 세기가 감소하다가 경계면을 기준으로 하여, 그 크기가 급격히 감소하고 있다. 그러나 화염 경계면의 외곽에도 약간의 NO 신호가 다소 나타나고 있으며,

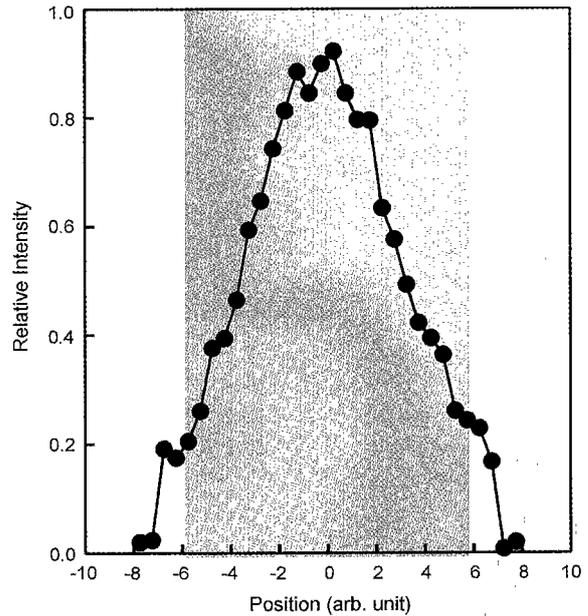


그림 11. 화염 위치에 따른 NO 신호의 세기.

이것은 화염에서 생성된 고온의 NO 분자가 화염 외곽으로 확산되므로써 발생한 것으로 이해할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 실험은 최근 국내에서 개발되고 있는 LPG 엔진의 연소실내 NO 분포를 실시간 가시화하기 위한 선행 연구로써 수행되었다. 희박연소화염에서 위치에 따른 NO 신호의 측정 결과, 화염의 중심에서 강한 NO 신호가 발생하였으며, 화염 경계면의 바깥 부분에서도 NO가 존재함을 확인하였다. 또한 레이저 출력에 따른 측정에서는, 본 실험의 범위에서, 매연화염과 희박연소화염에서 서로 다른 경향이 나타났다. 희박연소화염에서는 선형적인 의존성이, 매연화염에서는 포화의 경향을 보이는 비선형적인 의존성이 나타났다. NO를 첨가하여 측정한 결과, 두 화염에서 NO 농도와 형광 신호 사이에 각각 선형적인 비례 관계를 보였다. 희박연소화염과 매연화염에서의 NO 형광 신호의 상대적인 크기를 비교한 결과 매연화염에서 NO의 농도가 높은 것으로 관측되었다. 매연화염에서는 흑체 열복사 배경잡음의 수준이 높기 때문에, ICCD 카메라로 신호를 수집하는 경우에 동일한 NO 농도에 대해서도 NO 형광 신호가 강한 것처럼 인식될 수 있다. 따라서 엔진 연소실의 위치에 따른 NO 분포를 가시화하고자 하는 경우, 예컨대 산란광을 이용하여, 매연의 농도를 동시에 측정하여 영상을 보정해야 할 필요성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 “저공해 버스용 대형 LPG 엔진 개발” 연구의 1차년도 위탁연구과제(1999. 11~2000. 11)로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] G. Grünefeld, *Laser Diagnostics Applied to Practical Combustion and Flow Systems* (Cuvillier Verlag, Göttingen, 1995).
- [2] A. C. Eckbreth, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species* (Abacus, Cambridge, 1988).
- [3] 정석호, 한재원, 정중수, 이원남, 고동섭, 김경수, 이기형, 강경태, 레이저응용연소계측(문운당, 서울, 2001).
- [4] 오승목, 조규백, 이중재, 고동섭, "평면 레이저 유도 형광법을 이용한 엔진 연소실 OH 라디칼 계측," 한국광학회지, 제 10권 6호, pp. 468-472, 1999.
- [5] M. Knapp, A. Luczak, V. Beushausen, W. Hentschel, P. Manz, and P. Andresen, "Quantitative in-cylinder NO LIF measurements with a KrF excimer laser applied to a mass-production SI engine fueled with isooctane and regular gasoline," *SAE paper* 970824, pp. 19-30, 1997.
- [6] C. S. Cooper, R. V. Ravikrishna, and N. M. Laurendeau, "Comparison of laser-saturated, laser-induced, and planar laser-induced fluorescence measurements of nitric oxide in a lean direct-injection spray flame," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 21, pp. 4823-4833, 1998.
- [7] R. V. Ravikrishna and N. M. Laurendeau, "Laser-induced fluorescence measurements and modeling of nitric oxide in counterflow partially premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 122, no. 4, pp. 474-482, 2000.
- [8] 김태권, "실린더내 화염가시화에 의한 연소진단기법 연구," 연구보고서 UCG 052-305M(통상산업부/과학기술처), 1995.
- [9] V. Bergmann, W. Meier, D. Wolff, and W. Stricker "Application of spontaneous Raman and Rayleigh scattering and 2D LIF for the characterization of a turbulent $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{N}_2$ jet diffusion flame," *Appl. Phys. B*, vol. 66, no. 4, pp. 489-502, 1998.
- [10] M. Knapp, A. Luczak, H. Schlüter, V. Beushausen, W. Hentschel, and P. Andersen "Crank-angle-resolved laser-induced fluorescence imaging of NO in a spark-ignition engine at 248 nm and correlation to flame front propagation and pressure release," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 21, pp. 4009-4017, 1996.
- [11] M. Tamura, J. Luque, J. E. Harrington, P. A. Berg, G. P. Smith, J. B. Jeffries, and D. R. Crosley "Laser-induced fluorescence of seeding nitric oxide as a flame thermometer," *Appl. Phys. B*, vol. 66, no. 4, pp. 503-510, 1998.
- [12] A. Bräumer, V. Sick, J. Wolfrum, V. Drewes, M. Zahn, and R. Maly "Quantitative two-dimensional measurements of nitric oxide and temperature distributions in a transparent square piston SI engine," *SAE*, paper 952462, pp. 119-126, 1995.
- [13] C. Schulz, V. Sick, U. E. Meier, J. Heinze, and W. Stricker "Quantification of NO A-X(0,2) laser-induced fluorescence: investigation of calibration and collisional influences in high-pressure flame," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 9, pp. 1434-1443, 1999.
- [14] F. Hildenbrand, C. Schulz, M. Hartmann, F. Puchner, and G. Wawrschin "In-cylinder NO-LIF imaging in a realistic GDI engine using krf excimer laser excitation," *SAE*, paper 1999-01-3545, pp. 1-11, 1999.
- [15] A. M. Wodtke, L. Huwel, H. Schlüter, G. Meijer, P. Andresen, and H. Voges, "High sensitivity detection of NO in a flame using a tunable ArF excimer laser," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 4, pp. 910-912, 1988.
- [16] A. O. Vyrodov, J. Heinze, M. Dillmann, U. E. Meier, and W. Stricker, "Laser-induced fluorescence thermometry and concentration measurements on NO A-X(0,0) transitions in the exhaust gas of high pressure CH_4 /air flames," *Appl. Phys. B*, vol. 61, no. 5, pp. 409-414, 1995.
- [17] 임인건, 이기철, 김응서, 남기중, 이성풍, "평면 LIF법을 이용한 증류 예혼합 프로판/공기 화염내 NO 농도 분포의 정량적 측정," 한국자동차공학회 1998년도 추계학술대회 논문집, 1998, pp. 172-179.
- [18] B. E. Battles and R. K. Hanson, "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," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 54, no. 3, pp. 521-537, 1995.
- [19] H. Okabe, *Photochemistry of Small Molecules* (John Wiley & Sons, New York, 1978), pp. 171-177.
- [20] LIFBASE (version 1.2), "database and spectral simulation," SRI report No. 98-021, 1998.
- [21] A. Brockhinke, A. T. Hartlieb, K. Kohse-Häinhaus and D. R. Crosley "Tunable KrF laser-induced fluorescence of C_2 in a sooting flame," *Appl. Phys. B*, vol. 67, no. 5, pp. 659-665, 1998.

NO measurements in lean-burn and soot flame using KrF laser

Sung-Min Son, Joong-Jae Lee*, and Dong-Seob Ko[†]

Department of Optical & Electronic Physics,

**Dept. of Electronic and Computer Engineering, Mokwon University, Taejon 302-729, KOREA*

[†]E-mail: dsko@mokwon.ac.kr

Seungmook Oh and Kern Yong Kang

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

Jong-Uk Kim

CAPST, Sungkyunkwan University, Kyungki-Do 440-746, KOREA

(Received January 29, 2001 ; Revised manuscript received May 22, 2001)

The KrF laser was employed to study NO fluorescence in lean-burn as well as in soot-burn flames. Blue-shifted NO fluorescence was observed in both of the flames. For both of the flames, the fluorescence intensity of NO and its relative background noise signal were measured with respect to the concentration of seeded NO molecule in the flame and the laser intensity. The results were analyzed qualitatively. Also, NO concentration distribution in the lean-burn flame was qualitatively determined from the intensity of the NO fluorescence.

Classification code : SP010.