

희박화염과 매연화염의 NO 측정

Measurement of NO in Lean Burn and Soot Flame

손성민¹, 고동섭¹, 오승목², 강건용², 김종욱³¹목원대학교 물리학과²한국기계연구원 열유체환경연구부³성균관대학교 금속공학부 플라즈마응용표면처리연구센터

dsko@mokwon.ac.kr

환경문제에 대한 인식이 높아지면서 각종 연소장치의 배출가스에 대한 규제치가 강화되고 있어서, 연소현상 연구는 연소효율 향상과 같은 경제적 측면뿐만이 아니라 환경오염의 해결 관점에서 그 필요성이 요구되어, 이미 오래 전부터 연소과정의 연구가 활발하게 진행되어 왔다.⁽¹⁾ 그러나 연소현상은 물리·화학적으로 빠르고 복잡한 반응과정을 수반하여 진행하므로, 레이저 분광학적 방법이 주로 계측수단으로 사용되고 있다. 본 연구는 OH 라디칼(radical) 계측에 이어서⁽²⁾ 상대적으로 그 특성이 이해되고 있지 않은 NO 라디칼에 초점을 맞추어 진행하였다.

여기광으로는 색소레이저의 2차 조화파(226 nm) 또는 ArF 레이저(193 nm)를 사용하여 계측하는데, 형광의 발생효율이 좋은 반면에 단파장의 광은 화염내에서 산란에 의한 광손실이 크고, 적색편이된 NO 형광을 계측하므로써 배경잡음이 큰 것이 단점으로 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 파장이 긴 KrF 레이저(248 nm)를 NO의 여기광원으로 사용하였다.^(3, 4) 이 경우, 청색편이된 NO 신호를 계측하기 때문에 상대적으로 계측효율은 감소하지만, 배경잡음이 적고, 위에서 언급한 레이저광에 비해서 산란현상이 상대적으로 적게 발생하기 때문에, 본 연구의 궁극적 목표인 엔진연소의 2차원 가시화를 고려하였을 때 적절한 여기광이라 판단하고, 그 선행연구로써, 버너화염의 연소상태에 따른 NO 신호의 특성을 조사하고 분석하였다.

그림 1에서 보는 바와같이 247.9 nm의 KrF 레이저에 의해 A-X(0,2)전이 가능성이 있다. 그런데 바닥상태에서 $v''=2$ 점유밀도는 볼츠만 분포로 예측하는 바와 같이, 일반적으로 점유밀도가 낮다.

따라서 상온에서는 KrF 레이저로 NO 신호를 계측하는 것은 거의 불가능하다. 그러나 고온, 고압 상태에서는 온도 재분포와 분자 충돌에 의해서 점유밀도가 증가하기 때문에 NO 신호를 계측할 수 있다. 한편 Frank-Condon 원리에 의해서 A-X(0,0)형광신호보다는 A-X(0,1)형광신호가 상대적으로 강하며, 그 파장은 236 nm 근처에 위치하고 있다.

그림 2는 각각 희박화염과 매연화염에 대해 레이저 출력을 변화시키면서 계측한 NO 신호의 변화를 보여주고 있다. 계측은 화염의 중심부분에서 이루어졌다. 레이저 출력은 광펄스당 100~350 mJ 범위에서 50 mJ 간격으로 변화시키면서 측정하였다. 그림 2에서 총신호(total signal)는 배경신호(background level)를 포함한 236 nm의 봉우리 세기이다. 희박화염에서는 총신호와 배경신호가 레이저광의 세기와 비

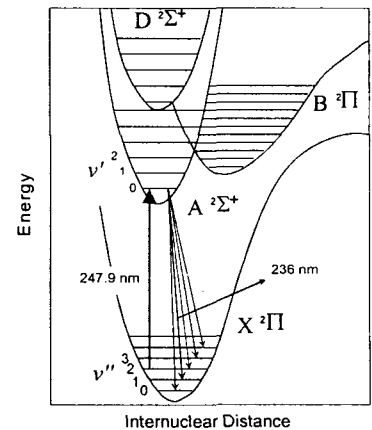


그림 1. KrF를 사용한 NO의 여기 및 형광 전이 과정.

교적 선형적인 관계를 보이고 있으나, 매연화염에서는 상대적으로 비선형적으로 증가함을 보여주고 있다. 그러나 신호 자체의 크기는 희박화염에 비해서 매연화염에서 강하게 나타나고 있어서 희박화염보다 매연화염에서 NO의 농도가 높음을 알 수 있다. 배경신호는 주로 연소장에서 발생하는 흑체 열복사 과정에서 발생한 것으로 분석하고 있으며, 따라서 희박화염에 비해서 매연화염에는 흑체역활을 하는 입자들이 상대적으로 많이 분포하고 있음을 알 수 있다.

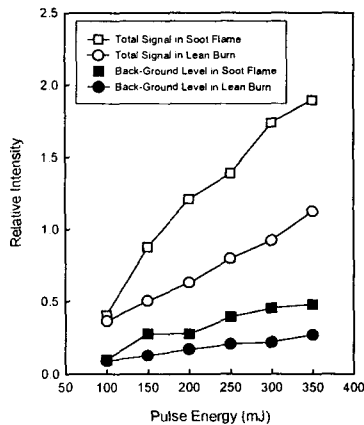


그림 2. 희박화염과 매연화염에 대해, 여기광 세기에 따른 계측 신호의 변화.

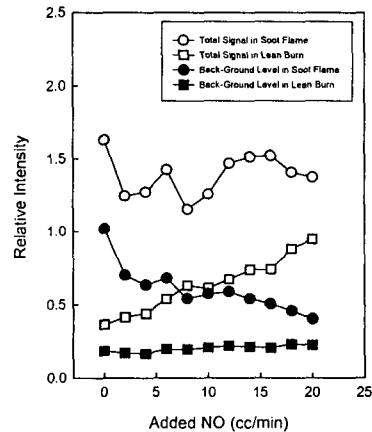


그림 3. 희박화염과 매연화염에서 NO 첨가량에 따른 계측 신호의 변화.

한편 그림 3은 NO 첨가량에 따른 NO 신호의 변화를 보여주고 있다. 희박화염에서는 NO 첨가량에 대해 총신호의 세기가 비교적 선형적인 의존성을 나타내고 있으나 매연화염에서는 총신호의 변화에서 유의한 변화가 나타나고 있지 않다. 그러나 매연화염에서 NO 첨가에 따라 배경신호가 감소하고 있다. NO를 첨가함에 따라서, 열복사의 근원인 매연입자의 농도가 감소하는 것으로 이해하였다. 총신호에서 배경신호를 뺀 NO의 신호는 희박화염과 매연화염에서 동일한 기울기를 보이고 있어서, NO의 농도와 NO의 형광세기는 비례함을 알 수 있었다. 여기서 얻은 결과는 내연기관의 연소상태에 따른 NO의 발생 기작을 연구하기 위한 기초자료로 활용할 예정이다.

[참고문헌]

[1] C. Grünfeld, *Laser diagnostics applied to practical combustion and flow systems* (Cuvillier Verlag, Göttingen, 1995).
 [2] 오승복, 조규백, 이중재, 고동섭, "평면 레이저 유도 형광법을 이용한 엔진 연소실 OH 라디칼 계측", 한국광학회지 **10**, 468~472 (1999).
 [3] 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 (1999).
 [4] 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. **38**, 1434~1443 (1999).