

LIIM(Laser-Induced Ion Mobility) 계측을 이용한 매연 나노입자 측정

이 의 주*

(2004년 4월 19일 접수, 2004년 7월 2일 심사완료)

Measurement of Soot Nano-Particle Using LIIM(Laser-Induced Ion Mobility)

Eui Ju Lee

Key Words: LIIM(레이저 유도 이온 이동성), Incipient Soot Particle(초기 매연 입자), Electrode(전극봉), Mobility(이동성)

Abstract

Experimental measurements of laser-induced ion mobility(LIIM) were performed for ethene/air premixed flames operated near the soot inception point. Soot was ionized using a pulsed laser operated at 532 nm. The ionization signal was collected with a tungsten electrode located in the post-flame region. Ionization signals were collected using both a single electrode and dual electrode configuration. Prior LIIM studies have focused on the use of a single biased electrode to generate the electric field, with the burner head serving as the path to ground. In many practical combustion systems, a path to ground is not readily available. To apply the LIIM diagnostic to these geometries, a dual electrode geometry must be employed. The influence of electrode configuration, flame equivalence ratio, and flame height on ionization signal detection was determined. The efficacy of the LIIM diagnostic to detect soot inception in the post-flame region of a premixed flame using a dual electrode configuration was investigated. For the different dual electrode configurations tested, the dual parallel electrode geometry was observed to be most sensitive to detect the soot inception point in a premixed flame.

1. 서 론

매연은 화석연료의 연소에서 발생하는 가장 흔한 부산물로서 환경문제를 일으키고 인체에 치명적인 해를 입히는 물질로 알려져 있다. 또한 매연생성의 전구물질인 PAH(polycyclic aromatic hydrocarbon)도 암과 같은 질병을 유발하는 유해물질로 알려져 있다. 매연 형성의 상세한 이해는 진행 중이고, 수 마이크로 초 이내에 연료분자에서 매연 입자로 바뀌는 현상을 이해하는데 어려움이 있다. 많은 연구들에 의해서 매연 형성 과정이 밝혀지고 있지만, 화염에서의 모델링을 위

해 PAH와 매연의 상산화학 반응, 초기 매연 입자의 생성 등에 대하여 보다 많은 정보가 필요하다.^(1,2) 특히, 초기 매연 입자의 생성은 가장 알려지지 않은 과정 중 하나이므로 적절한 모델링을 위해서 연구되어야 할 분야이다.⁽³⁾

이 연구의 최종목표는 직접적인 방법으로 초기 매연 입자를 판별하는 방법론을 제시하는 것이다. 간접적인 방법으로는 매연 입자를 샘플링하여 DMA(differential mobility analyzer)를 통과시켜 입자의 분포를 얻는 방법과 TEM(transmission electron microscopy)으로 형상(morphology)을 얻는 방법들이 사용되고 있지만, 레이저를 이용한 직접적인 방법들인 LII(laser-induced incandescence), LIF(laser-induced fluorescence) 그리고 LLS(laser light scattering)들이 많이 사용되고 있다. 이러한 레이저를 이용한 계측방법과 함께 LIIM(laser-

* 회원, 한국건설기술연구원 화재 및 설비부
E-mail : ejlee@kict.re.kr
TEL : (031)9100-383 FAX : (031)9100-381

induced ion mobility) 계측방법으로 예혼합 화염에서 매연 입자의 크기를 예측하는 연구가 수행되었다.⁽⁴⁾ 이 연구에서는 아세틸렌/공기 예혼합 화염에서의 매연 입자 뿐 아니라 화염에 250 amu 미만의 가벼운 금속을 첨가하여 신호를 매연과 비교하였다. 이러한 광계측 방법은 기존의 LII 계측에서는 불가능했던 수 나노미터의 입자를 측정할 수 있는 잇점이 있는데, 매연 초기 입자의 크기가 수 나노미터인 점을 고려하면 이러한 작은 입자 측정에 좋은 계측방법이라는 것을 알 수 있다.^(4,5) 그러나 확산 화염의 경우에 LIIM 계측방법은 화염자체의 특성상 급격한 온도 및 농도 구배가 생겨 예혼합 화염에 비해 비교적 사용하기 어려우며, 한정된 확산화염에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 기존의 LIIM 계측방법을 수 나노미터의 매연 입자 검출과 측정을 위해서 도입하였고 두 가지의 새로운 실험방법 디자인을 통해 수행되었다. 첫째로는 이온 신호를 검출하기 위해서 기존의 단일 전극봉(single electrode system)을 쌍 전극봉(dual electrode system)으로 바꾸었다. 단일 전극봉을 사용하는 경우에는 버너 표면을 하나의 전극 또는 접지로 사용하기 때문에 버너가 전도체이어야 한다. 하지만 WSR(well-stirred reactor)와 같은 많은 일반적인 연소기에서는 열을 견디기 위해서 세라믹과 같은 절연 물질을 많이 사용하고 있고 단일 전극봉으로는 이온의 검출이 불가능하므로 쌍 전극봉의 도입은 LIIM 계측방법의 광범위한 사용을 위해 필요한 변형이다. 두 번째의 변형은 매연 입자의 이온화를 위해 532nm의 파장을 갖는 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 무게를 알고있는 물질의 이온의 이동성(mobility) 등을 검출할 수 있다면 매연 입자의 무게나 크기를 결정하는데 좋은 참고자료가 될 것이다. 532nm의 파장대는 C₂ 이온의 Swan system과 겹치게 되고⁽⁷⁾ 다른 금속물질의 첨가 없이⁽⁵⁾ 상대적 질량표시자로서 보다 쉽게 사용할 수 있었다.

2. 실험방법

에틸렌/공기 예혼합 화염을 Perkin- Elmer 슬릿 버너에 형성하였다. 슬릿의 길이는 5cm 이고, 버너 자체에 액체나 기체 상태의 물질을 흡출할 수

있는 별도의 입구가 존재하지만 본 연구에서는 사용하지 않았다. 버너 출구 주위에는 불활성 기체를 흘리지 않아 주위에서의 공기 유입을 허용하였으므로 엄밀한 의미에서는 부분적 예혼합 화염(partially premixed flames)으로 정의할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 새로운 형태의 LIIM 계측방법을 조사하는데 목적이 있기 때문에 주위 공기의 유입은 크게 문제되지 않는다. 자세한 버너의 모양과 규격은 참고문헌에서 볼 수 있다.^(4,5) 화염의 당량비를 바꾸기 위해서 공기의 유량은 3,920cm³/min로 고정하였고, 연료 유량은 매연 발생 당량비 근처에서 MFC(mass flow controller)를 이용하여 변화시켰다. 매연 이온의 이동성은 화염온도의 함수이기 때문에 본 실험에서는 코팅되지 않은 100 μm R-type 열전대로 온도를 측정하였다. 열전대에서 주위로의 복사 열전달은 비드 주위의 열평형(heat balance) 방정식으로 보상하였으며 열전대는 순수 백금으로 그리고 연소 생성물은 공기의 값으로 각각 가정하였다.^(8,9)

Fig. 1은 매연 이온 신호를 얻기 위한 LIIM 시스템을 보여주고 있다. 매연 입자를 이온화하기 위해 Continuum 사의 Nd:YAG 레이저를 사용하였고, 주파수 변조기(frequency doubler)를 이용하여 1064nm의 파장을 최종적으로 532nm로 변조하여 실험에 사용하였다. 레이저 광은 200mm 초점거리의 볼록렌즈를 지나 화염에 조사되고, 조리개(iris)를 초점렌즈 앞에 위치시켜 반사광을 차단하였다. 레이저로 여기된 이온과 전자(electron) 신호는 1mm 직경의 텅스텐 전극봉을 화염 내부에 위치시켜 검출하였다.

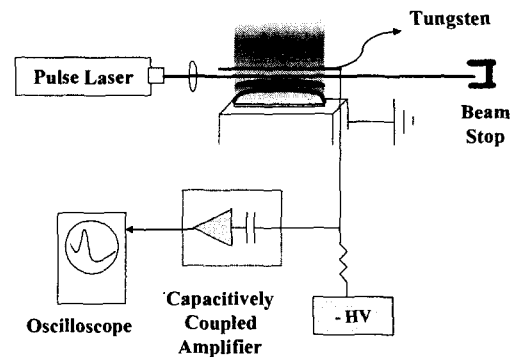


Fig. 1 Schematic diagram of laser-induced ion mobility experiment

본 연구에서는 두 가지 전극봉 형태로 실험하였는데, 먼저 단일 전극봉은 사용 파장에서의 검출 가능한 이온의 종류를 파악하는데 사용하고, 이전의 다른 파장의 레이저 결과와 비교를 하였다. 단일 전극봉은 음극의 고전압에 연결하였고, 버너를 접지하였다. 이온의 흐름으로서 발생하는 전류는 OP 앰프(amplifier)를 이용하여 증폭된 전압으로 바꾸었는데, 이는 이전의 실험장치와 유사하다.^(4,5,10) 이온 시그널의 진폭과 도착시간(arrival time)은 디지털 오실로스코프(LeCroy 3100A)를 이용하여 오차를 최소화하기 위해 100회 평균값을 이용하였고, 이때의 트리거 신호는 레이저의 펄스신호와 동기시켰다. 범용적 사용을 위해 도입한 쌍 전극봉은 단일 전극봉 시스템에서 버너에 접지된 부분을 다른 하나의 전극봉에 연결하여 사용하였다. 0.5mm와 2.5mm의 두 가지 쌍 전극봉 간격에 대해 조사하였고, 세라믹 절연체로서 두 전극봉을 구분하였다. 다양한 레이저광과 전극봉 거리의 효과는 다음 장의 결과에서 다루었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 전극봉 시스템

Fig. 2에 디지털 오실로스코프에서 얻은 일반적인 파형을 도시하였다.

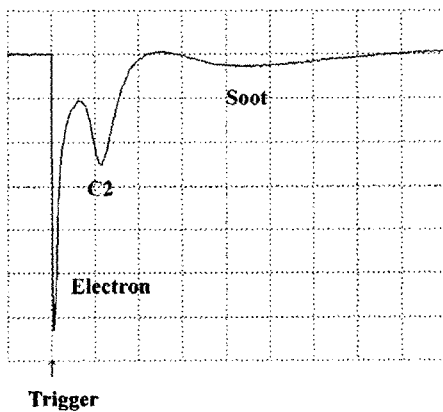


Fig. 2 Typical waveform traced by oscilloscope; the time scale (x-axis) is $20 \mu\text{s}/\text{division}$ and amplitude scale (y-axis) is $10 \text{ mV}/\text{division}$, the arrow indicates the trigger signal of pulsed laser

532nm의 파장을 사용하였을 경우에는 3개의 피크가 보인다. 첫 번째 피크는 전자의 피크로서 전자의 무게가 가볍기 때문에 레이저의 동기 신호와 시간차 없이 전극봉에 의해 검출됨을 알 수 있다. 두 번째 피크(도착시간= $22 \mu\text{s}$)는 전자 시그널보다 작은 진폭을 보이고, 3번째 피크(도착시간= $90 \mu\text{s}$)는 가장 늦은 시간에 보이고 시그널이 넓게 분포되어 있다. 피크의 도착시간은 부과된 전기장의 세기와 전극봉-레이저광 거리에 따라 변한다. 본 실험에서 대부분의 실험을 수팅 화염조건에서 수행하여 과잉연료 예혼합 화염의 매연이 있는 휘염(sooting flames) 부근에서 이루어졌다. 또한, 청염(non-sooting flames) 조건에서는 어떤 신호도 얻지 못하였으므로 이 3가지 피크는 모두 화염의 매연 입자에서 기인되는 것으로 판단된다.

피크들이 나타내고 있는 이온의 종류를 구체화하기 위하여 Smyth and Mallard⁽⁴⁾의 연구결과를 이용하였다. 즉, 아세틸렌/공기 예혼합화염에서 Na 이온을 첨가하고 -900 V로 바이어스된 전극봉과 레이저를 4 mm 간격을 두었을 때, Na 이온 피크의 도착시간은 약 $6 \mu\text{s}$ 이었다.⁽⁴⁾ 본 연구에서도 동일한 실험조건하에서 실험을 수행하여 피크의 도착시간을 조사한 결과, 두 번째 피크가 $6 \mu\text{s}$ 의 도착시간을 가짐을 확인하였다. 이 같은 사실로부터 본 연구에서의 두 번째 피크는 매연 입자가 레이저에 의해 이온화될 때 발생하는 C_2^+ 이온에서 비롯됐다고 판단된다. 왜냐하면 C_2^+ 이온의 이동성은 Na^+ 이온과 무게가 비슷하므로 같다고 볼 수 있고, C_2 의 Swan 시스템은 본 연구에서 사용된 532 nm와 겹치기 때문이다.⁽⁷⁾

매연 이온의 이동성을 아세틸렌/공기 화염의 후단에서 측정하였다. 먼저 Fig. 3은 이온 피크 크기에 대한 조사된 레이저 파워의 영향을 당량비(equivalence ratio, ϕ)에 따라 나타낸 것인데, 레이저 파워는 주파수 변조기를 통과한 바로 이후에 파워미터로 측정하였다. 휘염의 경우에 레이저 파워를 증가시켰을 때 초기에는 급격히 전자 신호의 크기가 증가하지만, 1 mJ/pulse 이상에서는 포화되어 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 또한 청염의 경우에도 매연 입자가 없는데도 불구하고 신호가 나왔는데, 그 경향은 휘염의 경우와 유사하지만 전체적인 크기는 휘염의 1% 미만이다. 그러므로 화염에서 유발되는 배경 노이

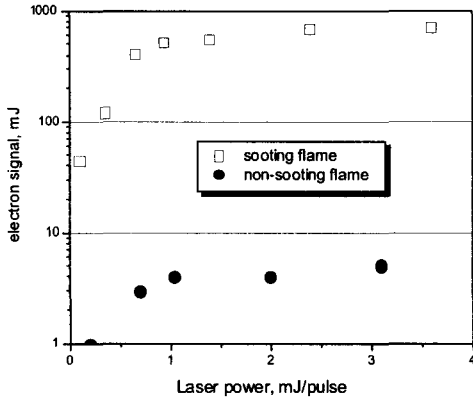


Fig. 3 Electron signal (the first peak) as a function of laser power in the sooting ($\phi=2.7$) and non-sooting ($\phi=2.3$) flame conditions

즈(background noise)는 레이저 파워에 무관하게 무시할 만 하다고 생각된다. 또한 화염이 없는 경우나 0.1 mJ/pulse 이하의 파워에서는 어떠한 신호도 얻을 수 없었다.

위의 결과로부터 본 실험장치에서는 1 mJ/pulse 근처의 레이저 파워가 가장 적당하다는 결론을 얻을 수 있는데, 이는 가장 큰 신호를 얻을 수 있을 뿐 아니라 큰 레이저 파워를 사용하였을 경우에 발생하는 빔의 단면적 증가를 줄일 수 있기 때문이다. 이 그래프에는 표시하지 않았지만, 파워를 변화시켰을 때 전자뿐 아니라 C_2^+ , Na^+ 이온의 도착시간은 변하지 않는 것이 관찰되었으므로, 이온의 이동성은 매연 입자를 이온화시킬 수 있는 이상에서는 파워에 무관하다는 것을 알 수 있었다. 이온의 이동성은 low-field 거동으로 특성화할 수 있는데, 이는 이동성이 전기장에 무관하다는 것을 의미한다.⁽¹¹⁾ 그러면 기체 필드에서 이온의 이동속도, v_d , 는 전기장의 세기, E , 에 직접적으로 비례하므로 평균속도에 관한 식, $v_d=KE$, 을 만족한다. 여기서 K 는 비례상수로서 이온의 이동성으로 정의된다. 단일 전극봉 시스템에서는 전기장의 구조가 매우 간단하므로 이온의 도착시간으로 쉽게 계산할 수 있다.

Fig. 4에 화염 당량비에 따른 C_2^+ 이온에 대한 매연 이온의 이동성을 화염의 높이별로 도시하였다. 매연 입자의 이동성이 하류로 갈수록 감소하므로 질량이 증가함을 알 수 있었고, 질량의 증가는 고온 유동장에서 매연 입자가 성장되는 사

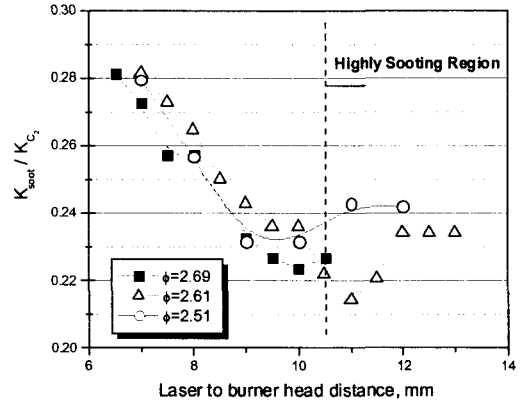


Fig. 4 The ratios of soot ion mobility to C_2 ion according to the flame height

실을 보여주고 있다. 하지만 10mm 이상의 높이에서는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 매연 입자의 열적 이온화의 결과로서 설명할 수 있다. 즉, 증가된 매연 입자의 열적 이온화는 배경 노이즈를 증가시키고 전극봉 주위의 전기장을 변형시키므로 정확한 이동성의 데이터를 얻기 힘들다. 이러한 경향은 큰 수팅 정도를 띄는 밝은 휘염에서 눈으로 관찰되었다. 측정된 매연 입자의 이동성은 2.8-3.7 $cm^2/V\cdot s$ 이고, C_2 이온은 12.6-15.2 $cm^2/V\cdot s$ 의 범위에 존재한다.

3.2 쌍 전극봉 시스템

WSR과 같이 많은 버너들이 접지가 불가능하게 설계되었기 때문에 LIIM 계측방법을 보다 일반적으로 사용하기 위해서는 버너로의 접지가 필요없는 쌍 전극봉 시스템이 요구된다. 이러한 계측 시스템은 C와 H 원자를 검출하기 위해 사용한 적은 있지만,⁽¹²⁾ 자세한 특성은 조사되지 않았다. 쌍 전극봉 시스템은 기본적으로 단일 시스템과 장치가 동일하지만 몇 개의 전극-레이저 형상을 Fig. 5와 같이 바꾸어 만들 수 있다. (a) 전극봉과 평행인 레이저 빔, (b) 전극 사이에 각도를 갖는 레이저, (c) 전극과 수직인 레이저. 이 세가지 경우의 신호를 조사하면 어떤 조합이 최적의 신호를 얻을 수 있는지 알 수 있으므로, 각각의 성능을 조사한 결과 슬릿버너에서 형성된 화염에서는 (a)의 평행인 경우가 최적의 조합이라는 결론을 얻었다. 먼저 (b)의 경우에는 레이저 빔이 전극 사이를 각도를 가지고 통과하기 때문에 전극과

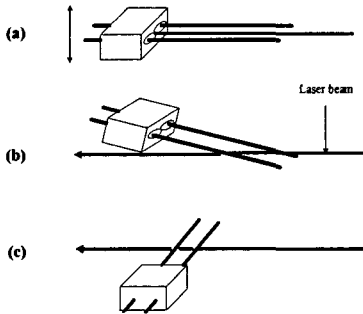


Fig. 5 Electrode Configurations for duel electrode system: (a) Parallel, (b) Inclined and (c) Perpendicular to laser beam

빔의 거리가 최소화되어 큰 값의 신호를 얻을 수 있지만, 노이즈가 커 20%에 가까운 N/S 비를 보인다. 그리고 (c)의 수직인 경우에는 기하학적 특성에 기인하여 이온의 포집이 한 점에서만 이루어지기 때문에 신호의 크기가 상당히 작고, 매연 입자가 발생하는 희미한 휘염 부근에서는 신호를 검출하지 못하였다. 또한 두 가지의 전극거리를 조사하였을 때, 0.5mm 거리의 쌍전극은 비록 초점렌즈를 이용하여 빔의 단면적을 최소화했음에도 1 mJ/pulse 근처의 파워와 높은 전압에서는 아크(arc)가 발생한다. 그러므로 비록 최적의 거리라고 할 수는 없지만 2.5mm 거리가 적당하다는 결론 또한 얻을 수 있었다. 마지막으로 대상화염이 달라졌을 때는 쌍 전극봉의 형태도 바뀌어야 한다. 즉, 확산 화염과 같이 급격한 농도 및 온도가 변하는 화염에서는 시그널의 크기보다는 포집위치의 정확도(resolution)가 더 중요하기 때문에 (c)의 형태를 사용해야 될 것으로 판단된다.

Fig. 6에 레이저빔과 평행인 쌍 전극봉에서의 전자와 이온들의 시스날 크기와 도착시간을 도시하였다. C₂와 매연 이온들의 도착시간은 전극-빔 간격이 커질수록 증가함을 알 수 있다. 이는 개략적으로 평행한 경우에는 전기장의 세기가 거리의 제곱에 반비례하므로 이온의 도착시간이 2차 곡선의 형태를 보인다. 레이저 빔과 전극봉 거리에 따른 이온 시그널의 전체적인 크기는 증가하였다가 감소하는 모습을 보이는데, 이는 연소 유동장의 이동 속도(drift velocity)에 기인한다. 즉, 이론적으로는 전극과 빔의 거리가 0mm인 경우에 최대의 신호크기를 보여야 하지만, 이온들이 유

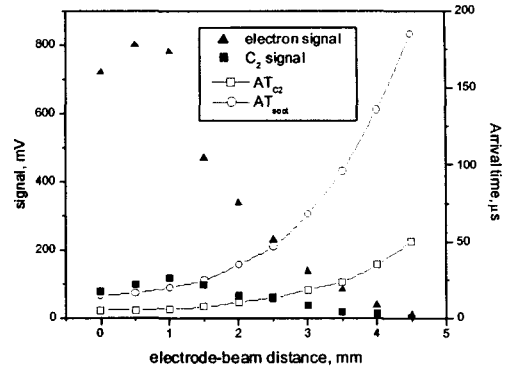


Fig. 6 Effect of electrode-beam distance on the peak amplitude and arrival time of ions. The experimental conditions; $\phi=2.69$, laser power=0.6 mJ/pulse, electrode biased at 500 V, laser beam above 10 mm of burner head

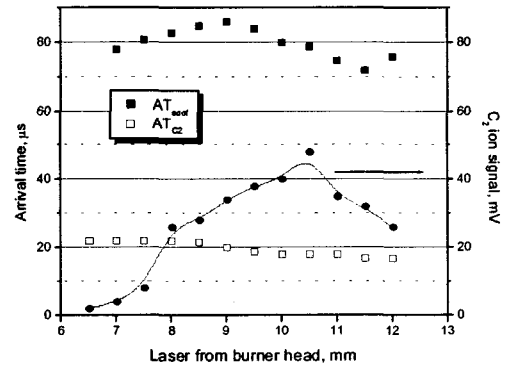


Fig. 7 The arrival time and signal amplitude of C₂ and soot ion of as a function of flame height

동장 자체에 의한 축방향 속도를 가지고 있으므로 약간 아래의 거리, 본 실험에서는 1mm에서 최대의 신호크기를 보이고 있다.

화염 높이에 따른 전자, C₂ 그리고 매연 이온의 신호를 Fig. 7에 나타냈는데, 매연 피크의 크기는 범위도 넓고 크기도 작아 정량화하지 못하였다. 이 그림에서 C₂ 이온의 도착시간은 하류로 갈수록 단조 감소하는데 반하여 매연의 도착시간은 극대점을 가지는 경향을 보인다. 이 결과로부터 매연의 신호는 C₂ 이온보다 쉽게 열적 이온화

에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. C_2 이온신호의 크기 또한 극대점을 보이는데 하류에서 감소하는 경향은 역시 열 이온화에 기인한 전기장의 변형때문으로 판단된다.

3.3 예혼합 화염에서의 초기 매연 입자

예혼합 화염에서 초기 매연 입자의 크기를 측정하였다. 매연 입자의 무게 또는 크기를 예측하기 위해서는 두 단계의 과정을 거쳐야 한다. 먼저 알려진 전기장의 세기에서 얻어진 매연 이온의 이동성을 측정하여야 하고, 다음에 질량-이동성 관계식에서 매연 입자의 질량을 얻는다. 비록 Langevin 이론은 일정한 충돌 단면적에서 이온과 비전하의 기체 사이에 열적 평형이 이루어져 있어 간섭이 미미한 경우에 대한 이동성과 질량과의 관계를 잘 정량화하고 있지만, 매연 입자와 같은 상대적으로 큰 입자에 대해서는 더 이상 유효하지 않다.⁽¹¹⁾ 따라서 이동성으로부터 질량을 알기 위한 두가지의 방법이 제안되었다. (a) 실험적 이동성-질량 관계,⁽¹³⁾ (b) 분자운동론에 근거한 이론적 표현⁽¹¹⁾의 사용이다. 후자의 방법을 이용하기 위해 Smyth and Mallard는 매연-소듐 이온의 이동성 비를 우라늄 이온의 값과 비교하여 측정하였다.⁽⁴⁾ 본 연구에서 먼저 초기 매연을 만들기 위해 연료 유량을 청염조건에서 서서히 증가시켜 처음 목측으로 휘염이 보이는 화염조건으로 결정하였다. 이 때 본 실험장치에서는 당량비가 약 2.5이었다. 700 V-900 V로 바이어스된 쌍 전극봉과 단일 전극봉을 각각 사용하였을 경우에 C_2 이온의 이동성은 15.2-14.3 $cm^2/V\cdot s$ 이었고, 매연 이온은 3.6-3.5 $cm^2/V\cdot s$ 로 측정되었다. 위의 두가지 이동성-질량 관계식을 적용하였을때, 매연 질량은 2100-2300 amu의 범위에 존재하였고, 매연 입자의 밀도를 1.8 g/cm^3 로 가정하면,⁽⁴⁾ 약 1.6 nm의 입자 크기를 얻을 수 있다. 실험적 관계식에서 변형 이동성(reduced mobility)을 구할 때는 측정된 온도인 2005K와 대기압의 조건을 사용하였다. 하지만 C_2 이온의 경우에는 80 amu의 질량이 예측되었는데 이는 실제 질량인 24 amu 근처와 상당한 차이가 보인다. 그러므로 광범위한 범위에서 정확하게 이온의 질량을 예측하기 위해서는 보다 깊은 고찰이 향후에 필요하다.

입자 크기의 결정 뿐 아니라 LIIM 신호의 매연 이온에 대한 민감도를 조사하여 Fig. 8에 도시하

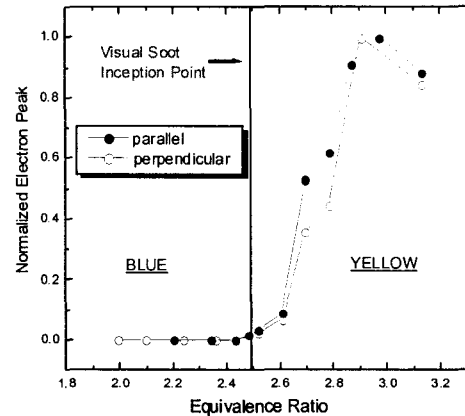


Fig. 8 The sensitivity of electron signal on incipient soot

였다. 연료유량을 증가시키며 청염에서 휘염조건으로 바꾸었고, 초기 매연 형성 지점은 눈으로 관찰하였다. 매연 입자 검출의 반응변수로서는 매연 입자가 이온화될 때 부가적으로 발생하는 전자의 신호로서 사용하였다. 결과에서 보듯이 비록 전자 신호의 크기 증가는 정확히 초기 매연 발생과 일치하지 않고 지연되지만 수 나노미터 크기의 입자를 검출하는 좋은 판단 기준으로 사용할 수 있고 판단된다.

4. 결론

에틸렌/공기 예혼합 화염에서 초기 매연 입자의 검출과 크기 측정을 위하여 LIIM 방법을 도입하였다. 기존의 계측에 두 가지의 새로운 방법을 도입하였다. 하나는 532nm의 Nd:YAG 레이저를 사용하여 C_2 이온의 이동성을 부수적으로 얻을 수 있었다. 따라서 입자 크기를 예측하는데 사용될 수 있는 다른 금속 입자의 첨가가 필요 없는 간단해진 계측방법을 개발하였다. 다른 하나의 새로운 방법은 범용적인 적용을 위한 쌍 전극봉의 사용이었다. 절연체로 만들어진 버너에서도 사용할 수 있는 이 방법을 위하여 전극봉과 레이저 빔과의 3가지 조합을 만들어 시험한 결과, 평행인 조합이 균일한 유동장에서 가장 이상적인 시스템임을 확인하였다. 당량비 2.5에서 얻어진 초기 매연 입자는 2100-2300 amu의 질량과 1.6 nm의 직경을 가짐을 측정할 수 있었다. 비록 매

연발생이 큰 화염에서는 매연 또는 다른 입자의 열적 이온화가 전기장을 변형시키므로 사용할 수 없는 단점이 있지만, 초기 매연 발생 조건에서는 개선된 LIIM 방법이 매연 발생 표시자로서 충분히 민감하다는 사실로 미루어 매연 형성과정 중 가장 알려져 있지 않는 과정인 PAH로부터 초기 매연 입자 형성에 관한 연구에 귀중한 도구로서 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Glassman, I., 1988, "Soot Formation in Combustion Process," *Proc. Comb. Inst.*, Vol. 22, pp. 295~311.
- (2) Richter, H. and Howard, J. B., 2000, "Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Growth to Soot - A Review of Chemical Reaction Pathways," *Proc. Comb. Inst.*, Vol. 26, pp. 565~608.
- (3) Kennedy, I. M., 1997, "Models of Soot Formation and Oxidization," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, pp. 95~132.
- (4) Smyth, K. C. and Mallard, W. G., 1981, "Laser-Induced Ionization and Mobility Measurements of Very Small Particles in Premixed Flames at the Sooting Limit," *Comb. Sci. and Tech.*, Vol. 26, pp. 35~41.
- (5) Mallard, W. G. and Smyth, K. C., 1982, "Mobility Measurements of Atomic Ions in Flames Using Laser-Enhanced Ionization," *Comb. Flame*, Vol. 44, pp. 61~70.
- (6) Smyth, K. C., Miller, J. H., Dorfman, R. C., Mallard, W. G. and Santoro, R. J., 1985, "Soot Inception in a Methane/Air Diffusion Flame as Characterized by Detailed Species Profiles," *Comb. Flame*, Vol. 62, pp. 157~181.
- (7) Pearse, R. W. B. and Gaydon, A. G., 1976, *The Identification of Molecular Spectra*, Fourth Edition, Chapman and Hall, London.
- (8) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1985, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- (9) Shaddix, C. R., 1999, "Correcting Thermocouple Measurements for Radiation Loss: A Critical Review," *Thirty-Third National Heat Transfer Conference*, New Mexico.
- (10) Travis, J. C. and Turk, G. C., 1996, *Laser-Enhanced Ionization Spectrometry*, John Wiley & Sons, New York.
- (11) Revercomb, H. E. and Mason, E. A., 1975, "Theory of Plasma Chromatography/Gaseous Electrophoresis - A Review," *Anal. Chem.*, Vol. 47, pp. 970~983.
- (12) Smyth, K. C. and Tjossem, P. J. H., 1990, "Relative H-atom and O-Atom Concentration Measurements in a Laminar, Methane/Air Diffusion Flame," *Proc. Comb. Inst.*, Vol. 23, pp. 1829~1837.
- (13) Karasek, F. W., Kilpatrick, W. D. and Cohen, M. J., 1971, "Qualitatively Studies of Trace Constituents by Plasma Chromatography," *Anal. Chem.*, Vol. 43, pp. 1441~1447.