

대향류 에틸렌 확산화염내 PAH 및 매연의 생성에 미치는 n-헵탄 혼합의 영향에 관한 연구

최재혁* · 한원희**†

* 한국해양대학교 기관시스템공학부, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Study on Effect of n-heptane Mixing on PAH and Soot Formation in Counterflow Ethylene Diffusion Flames

Jae-Hyuk Choi* · Won-Hui Han**†

* Division of Marine System Engineering Korea Maritime University, Dongsam 2-dong, Yeongdo-gu, Busan, Korea

** Division of Marine Engineering System Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91(Jukgyo-dong), Mokpo, Korea

요약 : 매연과 다중고리 방향족 탄화수소의 생성에 대하여 n-헵탄의 혼합의 영향을 알아보기 위하여 순수에틸렌 대향류 확산화염에 n-헵탄을 소량 혼합하여 실험을 수행하였다. 매연체적분율과 PAH의 생성 계측에서는 레이저 유도 형광법 (laser-induced fluorescence; LIF)과 레이저 유도 백열법(laser-induced incandescence; LII)의 레이저 계측법을 이용하였다. 실험결과로 순수 에틸렌 화염에 소량의 n-헵탄을 혼합한 경우에는 매연과 다중고리 방향족 탄화수소가 상승하였다. 그러나 20% n-헵탄 혼합화염의 경우 LIF 신호가 감소하였다. 소량의 혼합화염의 경우, 다중고리 방향족 탄화수소와 매연의 상승은 n-헵탄 혼합에 의해 저온 영역에서의 메틸 라디칼의 증가로 의한다고 사료된다. 10% n-헵탄 혼합화염에 대한 화학반응 프로세스를 살펴본 결과 H 라디칼에 의한 반응율이 벤젠 생성에 결정적인 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 매연, 다중고리 방향족 탄화수소, 대향류 화염, n-헵탄, 메틸 라디칼

Abstract : In order to investigate the effect of n-heptane mixing on PAH and soot formation, small amount of n-heptane has been mixed in counterflow ethylene diffusion flame. Laser-induced incandescence and laser-induced fluorescence techniques were employed to measure soot volume fraction and polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH) concentration, respectively. Results showed that the mixing of n-heptane in ethylene diffusion flame produces more PAHs and soot than those of pure ethylene flame. However, signals of LIF for 20% n-heptane mixture flame were lower than that of pure ethylene flame. It can be considered that the enhancement of PAH and soot formation by the n-heptane mixing of ethylene can be explained by methyl(CH₃) radical in the low temperature region. And it can be found that reaction rate of H radical for 10% n-heptane plays a crucial role for benzene formation.

Key Words : Soot, Polycyclic aromatic hydrocarbon(PAH), Counterflow flame, n-heptane, methyl radical

1. 서론

선박으로부터의 오염물질 배출은 전 세계적으로 심각한 수준에 있으며, 2020년경에는 선박에서의 이산화탄소(CO₂) 등의 온실가스를 포함해 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 및 입자상물질(Particulate matters, PM)이 육상운송용 배출량을 능가할 것이라는 보고가 있다(EEB, 2004).

현재 이러한 환경문제의 심각성이 대두됨에 따라 선박 내연기관 등은 엄격한 공해물질 배출규제를 받고 있으며 최근에 들어 그 규제가 강화되고 있다. 탄화수소(Hydrocarbon) 연료로

운전되는 연소기기의 배기가스는 일반적으로 질소(N₂), 산소(O₂), 이산화탄소(CO₂), 수증기(H₂O), 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 미연탄화수소(UHC), 황산화물(SOx), 매연(Soot) 등으로 구성되어 있다. NOx, CO, UHC, SOx는 대기오염 규제를 받고 있으며 CO₂의 증가는 온실효과(Greenhouse effect)를 가진다. 이 중 특히 매연은 대기 오염물질의 하나인 입자상물질(Particulate matter)로 환경오염을 비롯한 심각한 문제들을 일으키고 있다. 한편 화염 중에 생성되는 매연입자는 공업적으로는 중요한 복사매체이며 화로나 보일러에서는 피열체나 전열관으로 열을 효과적으로 전달하기 위한 중요한 역할을 하나, 보일러와 같은 노 내에 전열관이 설치된 경우에는 매연입자가 온도 구배에 의해 발생하는 열영동(Thermophoresis)에 의해 전열관

* 대표저자 : 종신회원, choi_jh@hhu.ac.kr, 051-410-4257

† 교신저자 : 종신회원, winhan@mmu.ac.kr, 061-240-7224

이나 노벽에 부착하여 열전달 성능을 악화시킬 가능성도 있다(Choi et al., 2008). 따라서 매연 입자의 생성 특성 및 매연입자의 구조를 파악하는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

전 세계적으로 매연 발생의 상당한 원인이 해상과 육상의 교통수단에 의한 발생이다(Hernandez et al., 2008). 이에 해상 및 육상의 교통수단 연료로서 매우 중요한 가솔린과 디젤 등의 액체연료에 의한 매연 생성 특성에 관한 연구는 매우 흥미로운 연구 분야이다. 가솔린과 디젤 연료는 매우 다양한 탄화수소계(Hydrocarbon species)의 혼합물이다. 이들을 구성하는 주요 성분으로는 n-헵탄($n-C_7H_{16}$)과 톨루엔(C_7H_8)이다. 이 중 n-헵탄은 자동차 가솔린 엔진의 녹킹을 일으키기 쉽고, 옥탄가 0의 표준물질로 사용되고 있다.

이들 연료에 대해서는 Hernandez et al.(2008)과 Andrae et al.(2005)에 의해 이들을 혼합한 경우의 Auto-ignition과 반응기구(Reaction mechanism) 검증, Ignition delay time에 대한 연구들이 대부분이다(Maroteaux and Noel, 2006; Gauthier et al., 2004; Vanhove et al., 2006). 특히 디젤연료의 대체연료로 주목 받고 있는 Dimethyl Ether(DME; CH_3OCH_3)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(윤 등, 2010; Yoon, 2005). 윤 등(2010) 및 Yoon(2005) 등은 레이저 흡수법(Laser extinction method) 및 레이저 산란법(Laser scattering method)과 레이저 유도 형광법(Laser-induced fluorescence; LIF)과 레이저 유도 백열법(Laser-induced incandescence; LII)의 레이저 계측 기법을 각각 이용하여 디젤연료의 대체연료로서 주목을 받고 있는 Dimethyl Ether(DME; CH_3OCH_3)에 의한 매연 생성의 시너지 효과(Synergistic effect) 연구를 수행하여 청정연료로 알려져 있는 DME가 소량의 특정 비율에서는 에틸렌 순수 화염보다 더 많은 매연이 생성될 수 있다는 것을 밝혔다.

특히 디젤 매연은 폐암의 원인이 될 수 있다는 연구 결과들이 발표되면서 각 나라에서는 디젤 기관의 배기가스에 대한 규제를 매우 엄격하게 실시하고 있다. 이에 2011년도부터는 매연의 총량이 아니라 매연 입자의 개수를 규제하기 때문에 매연 입자의 개수의 대다수를 차지하는 10 nm 이하의 매연은 매연 생성 초기 단계인 핵생성(Nucleation) 단계가 매우 중요하다. 그러나 여러 가지 물리적인 인자에 따른 매연생성 특성은 아직 잘 알지 못하고 있는 실정이다. 따라서 디젤 연료로 이용할 수 있는 여러 가지 대체연료인 DME 및 바이오 디젤 등의 액체연료의 매연 생성 특성을 규명하고 이에 대한 자료를 구축하는 것이 향후 강화되는 매연 규제에 대처하는 데 필수적이다.

이와 같이 매연입자와 관련한 문제점들을 해결하기 위한 일환으로 본 연구에서는 내연 기관 및 발전용 가스터빈 등의 연소 기기에서 탄화수소 연료의 연소특성과 발생하는 공해물질 중 매연의 생성 특성을 규명하기 위하여 매연 생성에 가장 중요한 중간물질인 아세틸렌(C_2H_2)과 이를 n-헵탄과 혼합하여 확산화염에서 매연이 생성되는 특성을 파악하였다. 확산화염 내 매연 생성 계측에서는 레이저 유도 형광법과 레이저 유도 백열법의 레이저 계측법을 이용하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 버너의 개략도 및 직접사진을 나타낸다. 버너는 대향류 버너이다. 두 노즐의 직경 및 노즐 사이의 간격은 모두 10 mm 이고, 연료속도와 산화제 속도는 각각 28 cm/s와 18 cm/s이다. 하부 노즐에서는 C.P. 등급의 에틸렌(C_2H_4)과 99% 순도의 n-헵탄($CH_3(CH_2)_5CH_3$)의 혼합 기체를 분사하고, 상부 노즐에서는 질소 70%, 산소 30%의 산화제를 공급하였다. n-헵탄의 비등온도는 98.5 °C이므로 기화시키기 위해 가열기를 이용해 연료 공급 라인은 180 °C ± 3 °C(A)로 유지하고, 노즐 끝부분에서의 온도는 150 °C ± 3 °C(B)로 유지하면서 공급하였다. 액체 연료의 유량은 실린저(SGE, 50MDR-LL-GT)와 펌프(KDS100)를 사용해 계측되었다. 가스 유량조절을 위해 습식 가스미터로 검정된 질량유량계(Mass flow controller)를 사용하였다.

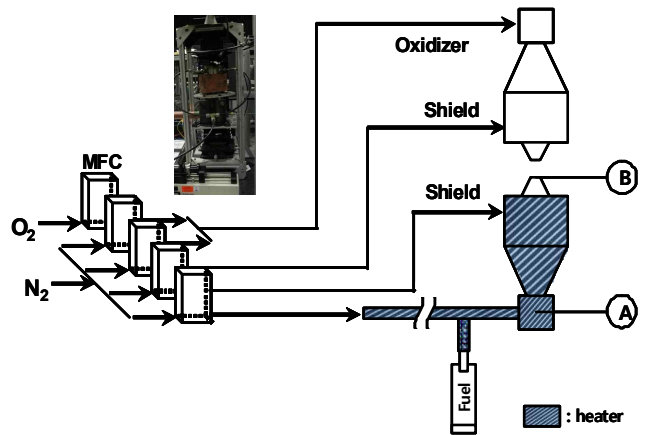


Fig. 1. Schematics of a burner and a direct photo(Left upper).

Fig. 2는 본 연구에서 레이저를 활용한 실험 장치의 개략도이다. 매연 농도분포의 계측을 위해 레이저유도 백열법을 적용하였다. 이는 매연입자에 고 에너지밀도의 레이저광이 조사된 후 냉각되는 과정에서 방출되는 복사에너지의 강도가 매연의 체적분율에 비례하는 특성을 이용한다. 입사광으로는 Nd:YAG 레이저의 2차 조화광인 532 nm를 사용하였고, 실린더형 렌즈와 볼록렌즈를 이용하여 평면광을 만들었다. 입사광의 강도는 평면빔 구배의 영향을 최소화하기 위하여 레이저 광의 강도를 변화시키면서 LII 신호가 포화되는 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 로 설정하였다. 복사신호의 계측에는 동기가 가능한 ICCD 카메라를 사용하였으며, PAH 형광 및 매연산란 신호로부터의 잡음을 제거하기 위해 카메라 앞에 협대역 필터(Narrow band pass filter, FWHM=10 nm)를 사용하여 400 nm 부근의 복사신호를 측정하였다.

ICCD 카메라의 측정시간(Gate time)은 매연입자 크기의 영향을 줄이기 위하여 측정지연(Gate delay) 없이 레이저가 화염에 조사된 후 100 ns 동안 측정하였다. PAH 농도분포의 계측에는 레이저유도 형광법을 적용하였다. 입사광으로는 Nd:YAG 레이저와 색소 레이저를 이용하여 283 nm의 자외선 영역의 빔을 화염에 조사하였다. 광학시스템의 기본 구성은 LII 측정법과 동

일하다 PAH LIF 측정 시 ICCD 카메라 앞에 330, 400, 450 및 500 nm의 협대역 필터(FWHM=10 nm)를 설치하여 PAH 의 이미지를 계측하였다. ICCD 카메라의 측정시간은 레이저가 화염에 조사된 후 30 ns로 하였다.

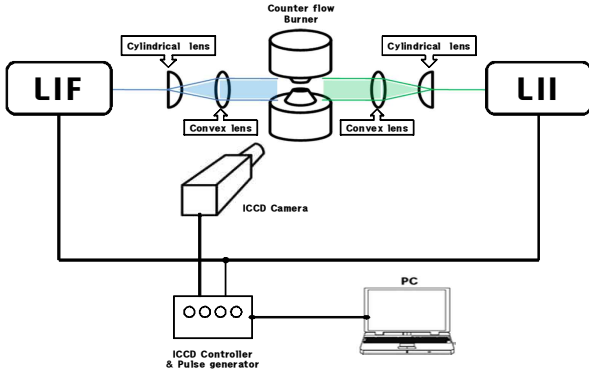


Fig. 2. Schematic of experimental setup for LII and LIF measurement.

3. 실험결과

Fig. 3은 순수 에틸렌 화염(0%)에 n-헵탄을 0.5%에서 20% 까지 혼합한 경우 연료측 노즐에서부터의 LII 신호를 나타내고 있다. 혼합비는 사용한 연료의 질량유량과 전체 혼합연료의 질량유량의 비로 정의 하였다. 그림에서 0 mm가 연료측이고 8 mm은 산화제측이다. 그림에서 알 수 있듯이 n-헵탄의 혼합을

이 증가할수록 LII 신호값이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 연료측으로부터 약 3.1 mm 부근에서 최댓값을 나타내고 있으며, 5% 이상에서는 그 값의 변화가 적다는 것을 알 수 있다. 그림에서 전체적으로 n-헵탄의 혼합에 따른 신호의 증가 값이 적은데 이것은 n-헵탄에 따른 매연 생성량이 크게 증가하지 않는다는 것을 의미한다.

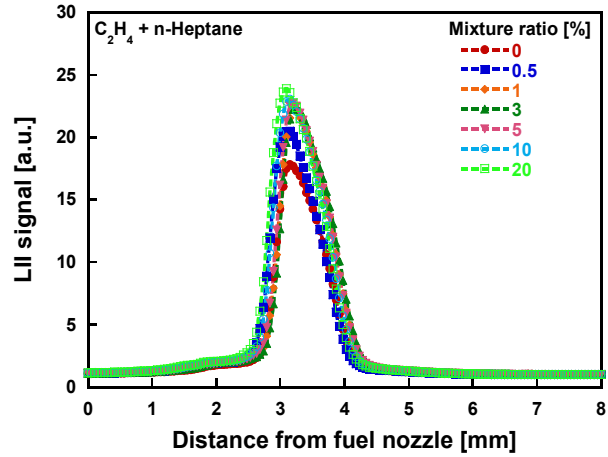


Fig. 3. LII signals for different wavelengths as a function of distance from fuel nozzle.

Fig. 4는 순수 에틸렌 화염(0%)에 n-헵탄을 혼합한 경우 330 nm, 400 nm, 450 nm 및 500 nm의 4 종류의 필터 파장에 따른 연료측 노즐에서의 LIF 신호를 나타낸다. 파장이 330 nm

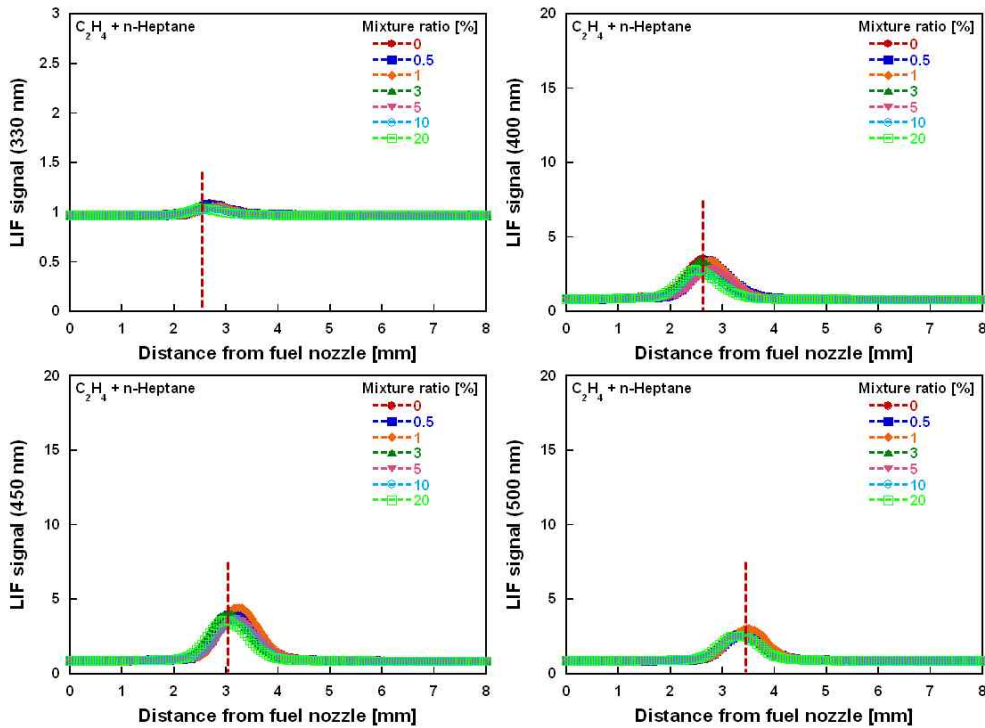


Fig. 4. LIF signals for different wavelengths as a function of distance from fuel nozzle.

의 경우 모든 경우에 대하여 신호가 매우 미약하였으며, 400 nm에서는 2.5 mm 부근에서 450 nm의 파장에서는 3.5 mm 부근에서 각 혼합비에 최대값을 나타내고 있다. 즉 본 연구의 대상인 n-헵탄 혼합화염의 경우 2.5 mm와 3.5 mm 사이에서 다중 고리 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAH)의 생성이 활발히 이루어지고 있다는 것을 의미한다. 500 nm 파장에서는 그 값이 감소하고 있는데 이것은 PAH가 450 nm에서 최대치를 이루며 매연 생성단계인 500 nm에서는 PAH가 감소한다는 것을 의미한다. 이 결과는 형광신호를 방출하는 PAH 화학종들이 매연생성과 밀접한 관계를 갖고 있음을 보여주고 있다. 그러나 20% n-헵탄 혼합 화염의 경우에는 그 값이 감소하고 있다는 것을 알 수 있는데 이것은 n-헵탄의 혼합이 일정 이상일 경우 매연 생성이 어려워진다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 5% n-헵탄 혼합화염과 20% n-헵탄화염에 대하여 순수 에틸렌의 값으로 일반화된 LII와 LIF 신호를 나타낸다. 신호의 최대값은 파장값이 증가할수록 연료층 노즐에서 멀어지고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 매연을 생성하기 위한 PAH가 화염쪽으로 가까워지고 있다는 것을 의미한다. LII의 신호는 LIF 신호보다는 연료층 노즐에서 떨어진 곳에서 나타나고 있다. 이것은 PAH의 생성이 매연 생성보다 우선하며 PAH가 매연의 생성에 영향을 미친다는 것을 확실히 나타내고 있다.

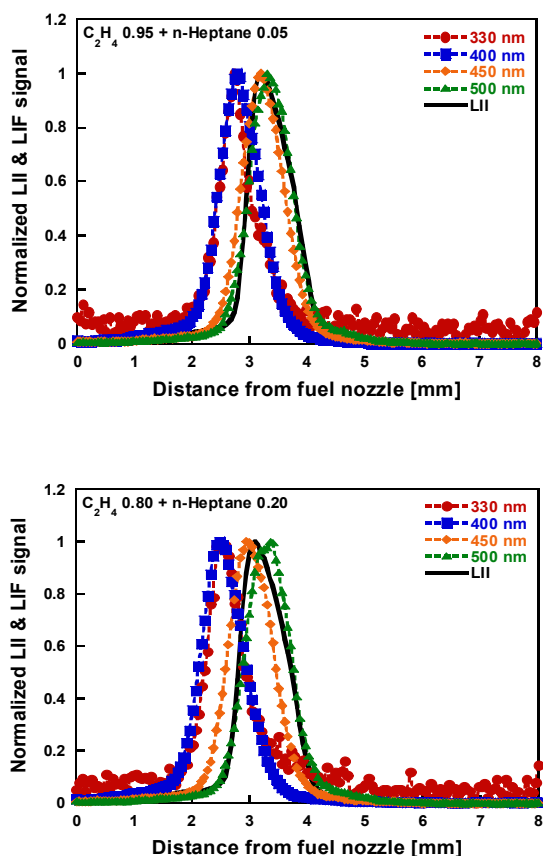


Fig. 5. Normalized LII and LIF signal for different n-heptane mixture ratio.

Fig. 6은 순수 에틸렌 화염(0%)에 n-헵탄의 혼합비율에 따른 최대 LII 및 LIF 신호를 나타낸다. 최대 LII 신호는 순수 에틸렌 화염보다 n-헵탄 혼합 화염의 경우가 큰 값을 나타내고 있는데 1%까지는 가파르게 상승하다가 3% 혼합에서 20%까지는 증가량이 크지 않다는 것을 알 수 있다. LIF 신호 역시 1%의 소량의 혼합에서 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 소량의 n-헵탄 혼합의 경우 PAH와 매연이 증가하고 있는데 원인으로서는 초기링 생성에 있어 n-헵탄의 화학구조(CH₃(CH₂)₅CH₃)에 의해 저온 영역에서의 메틸(CH₃)기가 매연 생성에 영향을 미친다고 생각되어진다. 그러나 일정 이상의 n-헵탄이 혼합될 경우에는 분리되기 어려운 강한 C-H의 결합에너지로 인해 메틸기 등의 생성이 상대적으로 어려워 초기링의 생성이 감소하여 PAH의 생성이 감소한 것이라 생각한다.

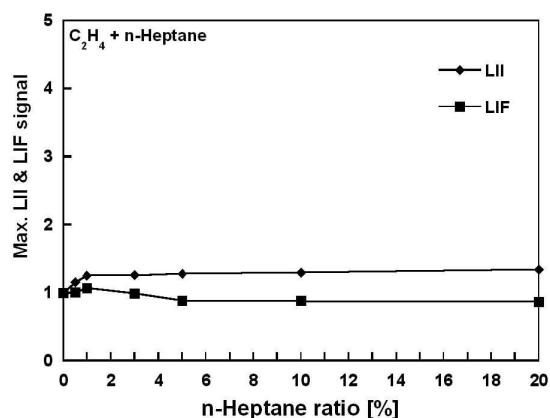


Fig. 6. LII and LIF Max. signal versus n-heptane ratio in the counterflow diffusion flame of ethylene.

C-H 결합의 에너지는 일반적인 탄화수소계열의 C-C 결합의 에너지와 비교할 때 상대적으로 강하게 결합되어 있다는 점을 고려하면, n-헵탄에서 탈수소화반응에 의한 C1-화학종으로의 생성 경로는 상대적으로 느리게 진행될 수 있다. 따라서 순수 에틸렌 화염에 n-헵탄이 혼합될 때 PAH 생성에서 상승효과가 나타나지 않은 것은 n-헵탄이 C1-화학종으로 분해되는 반응이 용이하지 않기 때문이라 판단된다. 또한 C1-화학종 이외의 다른 화학종이 매연 생성에 영향을 미칠 것이라 생각된다. 이에 관한 보다 상세한 화학반응 프로세스에 대해서 알아보기 위해서 10% n-헵탄 혼합화염에 대한 주요 반응식 및 반응율에 대하여 살펴보았다.

Table. 1은 순수 에틸렌 화염과 10% n-헵탄을 혼합한 혼합 화염에 대하여 주요 반응들에 대한 반응율을 나타낸 표이다.

여기서 사용된 반응 메커니즘은 143종의 화학종과 672 화학 반응을 다루고 있는 Andrae and Head(2009)에 의해 제안된 것을 사용하였다. 또한 에틸렌과 n-헵탄의 혼합의 경우 벤젠 고리 생성에 영향을 미치는 주요 화학반응 프로세스가 C₇H₁₆ → I* C₃H₇ → H → C₆H₆, C₇H₁₆ → I-C₃H₇ → H → H₂ → C₆H₆과 C₇H₁₆

대향류 에틸렌 확산화염내 PAH 및 매연의 생성에 미치는 n-헵탄 혼합의 영향에 관한 연구

→PC₄H₉→C₂H₅→H→C₆H₆인 것을 고려한다면 벤젠 생성에 H 라디칼이 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 최근에는 McEnally and Pfefferle(2007)과 Yoon et al.(2005)에 의해 탄화수소계열에 의한 혼합화염의 경우 초기 벤젠 생성 고리에 있어 영향을 미치는 화학종으로서 메틸과 프로파길(C₃H₃)이 중요하다 하였다. 이 결과로부터는 C₆H₅CH₃ + H ↔ C₆H₆ + CH₃ (R8)과 C₅H₆ + C₂H₃ ↔ C₆H₆ + CH₃ (R118)에 의한 반응 프로세스가 메틸에 의해 영향을 받고 있는데 그 비율은 6.14%로 어느 정도 벤젠 고리 생성을 영향을 미치고 있다. 따라서 n-헵탄 혼합화염의 경우 매연 생성을 위한 초기 벤젠 고리 생성에 메틸에 의한 영향도 중요하지만 H 라디칼의 생성율이 매연 생성에 결정적인 영향을 한다는 것을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 점은 본 연구의 대상인 n-헵탄 혼합 화염의 경우 Table 1에서 나타난 주요 화학반응 프로세스에서는 프로파길에 의한 영향은 나타나지 않았다는 것이다.

모든 경우에서 거의 신호가 잡히지 않았으며, 400 nm와 450 nm의 파장에서 각 혼합율에 따라 2.5 mm에서 3.5 mm사이에서 최대값을 나타내고 있다. 이는 대부분의 PAH 형성이 이 사이에서 형성되고 있음을 나타낸다. 500 nm파장에서는 그 값이 감소하고 있는데 이것은 다중 고리 방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAH)가 450 nm에서 최대치를 이루며 매연 생성단계인 500 nm에서는 PAH가 감소한다는 것을 의미한다.

순수 에틸렌 화염에 3% 이하의 소량의 n-헵탄을 혼합한 경우에는 매연과 다중 고리 방향족 탄화수소가 증가하였다. 그러나 5% 이상의 n-헵탄 혼합화염의 경우 LII 신호의 증가는 미미하였고, LIF 신호는 오히려 약간 감소하였다. 이것은 3% 이하의 소량 혼합화염의 경우, 다중 고리 방향족 탄화수소와 매연의 상승은 n-헵탄 혼합에 의한 메틸계 화학종의 영향이라 할 수 있겠다. 이에 10% n-헵탄 혼합화염에 대한 보다 상세한 반

Table 1. Reactions for 10% n-heptane mixture flame

Step (Num.)	Reaction	Reaction rate (moles/cm ³ s)	Q_percentage(%)
75	C ₆ H ₅ + H ₂ = C ₆ H ₆ + H	4.753E-06	65.47
69	C ₆ H ₅ + H = C ₆ H ₆	2.226E-06	30.67
8	C ₆ H ₅ CH ₃ + H = C ₆ H ₆ + CH₃	4.362E-07	6.01
66	C ₆ H ₆ + OH = C ₆ H ₅ + H ₂ O	-1.834E-07	-2.53
11	C ₆ H ₅ + C ₆ H ₅ CH ₃ = C ₆ H ₆ + C ₆ H ₅ CH ₂	6.496E-08	0.89
85	C ₆ H ₅ OH + H = C ₆ H ₆ + OH	-4.503E-08	-0.62
56	C ₆ H ₅ CHCH ₂ = C ₆ H ₆ + C ₂ H ₂	-1.687E-08	-0.23
120	C ₅ H ₆ + C ₆ H ₅ = C ₆ H ₆ + C ₅ H ₅	1.094E-08	0.15
118	C ₅ H ₆ + C ₂ H ₃ = C ₆ H ₆ + CH₃	9.094E-09	0.13
617	C ₆ H ₅ + C ₇ H ₁₆ = C ₇ H ₁₅ -1 + C ₆ H ₆	2.088E-09	0.03
618	C ₆ H ₅ + C ₇ H ₁₆ = C ₇ H ₁₅ -2 + C ₆ H ₆	1.108E-09	0.02
48	C ₆ H ₅ CH ₂ OH + H = C ₆ H ₆ + CH ₂ OH	6.367E-10	0.01
92	C ₆ H ₅ OH + C ₆ H ₅ = C ₆ H ₅ O + C ₆ H ₆	3.838E-10	0.01
39	C ₆ H ₅ CHO + H = C ₆ H ₆ + HCO	2.618E-10	0.00
64	C ₆ H ₆ + O = C ₆ H ₅ O + H	6.157E-11	0.00
58	OC ₆ H ₄ CH ₃ = C ₆ H ₆ + H + CO	5.121E-11	0.00
50	C ₆ H ₅ CH ₂ OH + C ₆ H ₅ = C ₆ H ₅ CHO + C ₆ H ₆ + H	2.323E-11	0.00
43	C ₆ H ₅ + C ₆ H ₅ CHO = C ₆ H ₆ + C ₆ H ₅ CO	4.806E-12	0.00
65	C ₆ H ₆ + O = C ₆ H ₅ + OH	-6.680E-13	0.00
67	C ₆ H ₆ + O ₂ = C ₆ H ₅ + HO ₂	-7.774E-14	0.00
623	C ₆ H ₅ + C ₈ H ₁₈ = AC ₈ H ₁₇ + C ₆ H ₆	9.167E-28	0.00
		7.260E-06	100.00

4. 결론

순수 에틸렌 대향류 확산화염에 n-헵탄의 혼합에 따른 PAH 및 매연 생성 특성을 규명하기 위하여 레이저 유도 형광법과 레이저 유도 백열법의 레이저 계측법을 이용하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

필터 파장 값에 따른 영향을 살펴본 결과, 330 nm의 경우

응 프로세스를 살펴본 결과 C₇H₁₆ → I*C₃H₇ → H → C₆H₆, C₇H₁₆ → I-C₃H₇ → H → H₂ → C₆H₆과 C₇H₁₆ → PC₄H₉ → C₂H₅ → H → C₆H₆이 주요반응으로 H 라디칼의 반응에 의한 벤젠 생성이 활발하였다. 이들 결과들로부터 n-헵탄 혼합화염의 경우 초기 벤젠 고리 생성 및 PAH와 매연 생성에 대하여 메틸의 영향도 중요하지만 H 라디칼에 의한 생성율이 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0004022).

참 고 문 헌

- [1] 윤두호, 윤석훈, 최재혁(2010), 대체 연료인 DME 혼합에 의한 대향류 에틸렌 확산화염내 매연 생성에 대한 실험적 연구, 해양환경안전학회지, 제16권, 제3호, pp. 241-322.
- [2] Andrae, J. C. G. and R. A. Head(2009), HCCI experiments with gasoline surrogate fuels modeled by a semidetached chemical kinetic model Original, Combustion and Flame 156, pp. 842-851.
- [3] Andrae, J., D. Johansson, P. Bjornbom, P. Risberg and G. Kalghatgi(2005), CO-oxidation in the Auto-ignition of Primary Reference Fuels and N-heptane/Toluene Blends, Combustion and Flame, Vol. 140, No. 4, pp. 267-286.
- [4] Choi, J. H., O. Fujita, T. Tsuiki, J. Kim and S. H. Chung(2008), Experimental study on thermophoretic deposition of soot particles in laminar diffusion flames along a solid wall in Microgravity, Experimental Thermal and Fluid, Sci., Vol. 32, pp. 1484-1491.
- [5] EEB; The European Environment Bureau(2004), Air Pollution from ships, pp. 1-15.
- [6] Gauthier, B. M., D. F. Davidson and R. K. Hanson (2004), Shock tube determination of ignition delay times in full-blend and surrogate fuel mixtures, Combustion and Flame, Vol. 139, pp. 300 - 311.
- [7] Hernandez, J. J., J. Sanz-Argent, J. Benajes and S. Molina(2008), Selection of a Diesel Fuel Surrogate for the Prediction of Auto-ignition under HCCI Engine Conditions, Fuel, Vol. 87, No. 6, pp. 655-665.
- [8] Maroteaux, F. and L. Noel(2006), Development of a Reduced N-heptane Oxidation Mechanism for HCCI Combustion Modeling, Combustion and Flame, Vol. 146, No. 1-2, pp. 246-267.
- [9] McEnally, C. S. and L. D. Pfefferle(2007), The effects of dimethyl ether and ethanol on benzene and soot formation in ethylene nonpremixed flames, Proc. Combust. Inst., Vol. 31, pp. 603-610.
- [10] Vanhove, G., R. Minetti, S. Touchard, R. Fournet, P. A. Glaude and F. Battin-Leclerc(2006), Experimental and modeling study of the autoignition of 1-hexene /isooctane mixtures at low temperatures, Combustion and Flame, Volume 145, Issues 1 - 2, pp. 272-281.
- [11] Yoon, S. S.(2005), Role of odd carbon chemistry on soot formation in ethylene-base diffusion flames with fuel mixing, Seoul National University, ph. D. thesis, pp. 56-73.
- [12] Yoon, S. S., S. M. Lee and S. H. Chung(2005), Effect of mixing methane, ethane, propane, and propene on the synergistic effect of PAH and soot formation in ethylene-base counterflow diffusion flames, Proc. Combust.Inst., Vol. 30, pp. 1417-1424.

원고접수일 : 2012년 01월 26일

원고수정일 : 2012년 02월 17일 (1차)

2012년 02월 22일 (2차)

게재확정일 : 2012년 02월 23일