

DME/에틸렌 연료의 PAH 및 매연의 생성 특성

윤 승 석¹⁾ · 이 상 민²⁾ · 정 석 호^{*1)}

서울대학교 기계공학부¹⁾ · 한국기계연구원²⁾

PAH and Soot Formation Characteristics of DME/Ethylene Fuel

Seungsuk Yoon¹⁾ · Sangmin Lee²⁾ · Sukho Chung^{*1)}

¹⁾School of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Emission Control Group, Korea Institute of Machinery and Material, 171 Jang-dong, Yuseong, Daejeon 305-343, Korea

(Received 22 December 2004 / Accepted 18 March 2005)

Abstract : In order to investigate the effect of dimethyl ether (DME) on PAH and soot formation, the fuel has been mixed to the counter-flow diffusion flames of ethylene. Laser-induced incandescence and laser-induced fluorescence techniques were employed to measure relative concentrations of soot volume fraction and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentration, respectively. Results showed that even though pure DME flame produces the minimal amount of PAH and soot, the mixture fuel of DME and ethylene could increase PAH and soot formation, as compared to those of pure ethylene flame. This implies that even though DME has been known to be a clean fuel for soot formation, the mixture fuel of DME and the hydrocarbon fuel could produce enhanced production of soot. Numerical simulation demonstrated that methyl (CH_3) radical generated by the initial pyrolysis of DME can be contributed to the enhancement of PAH and soot formation, through the formation of propargyl (C_3H_3) radical.

Key words : Soot(매연), PAH(다환방향족 탄화수소), DME(디메틸에테르), LII(레이저유도백열법), LIF(레이저유도형광법)

1. 서론

자동차로부터 배출되는 배기가스는 대기오염의 주된 원인이 되고 있다. 연료의 불완전 연소로 인해 생성되는 매연은 공해문제의 주요인 중의 하나로 특히 연료를 분무하여 산화제와 확산화염을 이루는 디젤엔진에서의 매연 배출은 대기오염의 주된 규제 요인의 하나가 되고 있다.

확산화염에서는 일반적으로 연료의 열분해를 거쳐 벤젠 및 나프탈렌 등의 초기 방향족 고리가 형성 되고, 이 고리가 성장하여 다환 방향족 탄화수소

(polycyclic aromatic hydrocarbon:PAH) 가 되고 이로부터 매연입자가 발생하고 성장과 응집 등을 거치면서 매연을 발생시키는 것으로 알려져 있다.¹⁻²⁾ 초기 벤젠고리 생성 및 PAH의 성장 경로로는 화염 내부에서 높은 농도를 유지하는 아세틸렌 (C_2H_2)의 역할이 강조되어 왔으며, 특히 Frenklach³⁾ 등에 의해 제안된 H-abstraction- C_2H_2 addition(HACA) 반응은 PAH의 생성 뿐 아니라 성장에서도 주요한 경로로서 주목 받아왔다. 하지만 최근 초기 벤젠고리 생성 및 PAH의 성장에서 HACA 반응과 더불어 메틸 (CH_3), 프로파길 (C_3H_3) 과 관련된 반응의 중요성이 제시되었다⁴⁻⁶⁾ 에틸렌 화염에 프로판을 혼합했을 때 PAH 및 매연의 생성이 급격히 증가한다는 실험 결

*To whom correspondence should be addressed.
shchung@snu.ac.kr

과는 프로판이 다량의 메틸로 열분해 될 수 있다는 것을 고려하면 매연 생성에서 메틸의 중요성을 보여준다.⁷⁾

최근 디젤엔진에서 배출되는 매연을 저감하기 위하여 경유의 대체연료로서 디메틸에테르(dimethyl ether:DME)의 적용 가능성이 제시된 바 있다.^{8,9)} DME는 분자 구조상 열분해 과정에서 다량의 산소 원자를 공급할 수 있고, 이에 따라 예혼합 특성의 연소를 할 수 있기 때문에 매연의 생성 및 배출을 저감할 수 있는 특징이 있다.

그러나, DME의 연소에서 고려되어야 할 점은 분자구조상 열분해과정에서 산소뿐만 아니라 다량의 메틸을 공급할 수 있다는 점이다. PAH 및 매연의 생성에서 메틸화합물의 중요성을 입증한 실험 결과를 고려할 때 DME를 연료로 하거나 첨가하는 연소 기기에서 DME 연료와 매연생성의 상관관계를 정확하게 규명하는 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 DME를 연료로 하는 디젤엔진과 같은 실용연소기에서의 매연 생성 특성을 규명하기 위하여 에틸렌 대향류 화염을 대상으로 DME를 혼합하는 실험 및 수치해석을 수행하였다. DME가 열분해 되는 경로를 분석하였고, 이를 바탕으로 DME의 매연생성 특성을 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 버너 및 유량 공급부와 매연 및 PAH 측정장치로 구성되어 있다. 버너는 대향류 버너로서 노즐 출구에서 균일한 유동을 얻기 위해 단면적비가 80:1인 두 개의 수축-확대 노즐을 상하 대칭으로 배치하여 대향류를 형성하였다. 두 노즐의 직경 및 노즐 사이의 간격은 모두 14.2mm이다. 하부 노즐에서는 C.P. 등급의 에틸렌(C_2H_4)과 DME(C_2H_6O)의 혼합 기체를, 상부 노즐에서는 질소 76%, 산소 24%의 산화제를 각각 19.5 cm/s의 평균유속으로 공급하였다. 안정적인 평면화염을 형성하고 연료 및 산화제를 주위 공기로부터 차단하기 위하여 상하 노즐 주위에 위치한 동심 노즐로부터 질소를 공급하였다.

DME 연료의 혼합비를 변화시키며 매연 및 PAH의 농도분포를 측정하였는데, 혼합비 β 는 DME 연

료의 질량유량과 전체 혼합연료의 질량유량의 비로 정의 하였다. 유량조절을 위해 습식 가스미터로 검정된 질량유량계(mass flow controller)를 사용하였다.

매연 농도분포의 측정을 위해 레이저유도 적열법(laser induced incandescence : LII)을 적용하였다. 이는 매연입자에 고 에너지밀도의 레이저광이 조사된 후 냉각되는 과정에서 방출되는 복사에너지의 강도가 매연의 체적분율에 비례하는 특성을 이용한다.¹⁰⁾ 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 5×10^8 W/cm²로 설정하였다.¹¹⁾ 복사 신호의 측정에는 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 측정 지연(gate delay) 없이 레이저가 화염에 조사된 후 100 ns 동안 측정하였다.¹¹⁾

PAH 농도분포의 측정에는 레이저유도 형광법(laser induced fluorescence : LIF)을 적용하였다. 입사광으로는 Nd:YAG 레이저와 색소 레이저를 이용하여 283 nm의 자외선 영역의 빔을 화염에 조사하였다. 광학시스템의 기본 구성은 LII 측정법과 동일하며, LII 신호를 제거하기 위해 레이저광의 강도는 1.2×10^8 W/cm²로 상대적으로 약하게 설정하였다. PAH LIF 측정 시 ICCD 카메라 앞에 450 nm의 협대역 필터(FWHM = 10 nm)를 설치하여 PAH의 이미지를 측정하였다. ICCD 카메라의 측정시간은 레이저가 화염에 조사된 후 30 ns로 하였다.

실험 결과에 대한 이해를 돕기 위해 대향류 확산 화염에 대한 수치해석이 수행되었다. C_3 메커니즘¹²⁾과 DME 메커니즘^{13,14)}이 혼합된 84 개 화학종과 532 반응 단계로 구성된 상세 화학반응 메커니즘을 적용하였다. 이 메커니즘은 벤젠 이후의 PAH 성장과 매연의 생성과 관련한 반응은 다루지 않고 있기 때

문에 초기 상태의 열분해 과정을 이해하는데 목적이 있다. 지배 방정식 및 수치 해석 방식에 대한 내용은 이전의 논문에서 자세하게 기술하였다.¹⁵⁾

3. 결과 및 고찰

에틸렌을 연료로 하는 대항류 확산 화염에서 측정된 LII와 PAH LIF의 이미지를 Fig. 1에 나타내었다. PAH와 매연의 분포는 청염으로부터 연료측으로 공간적으로 분리된 영역에서 검출되었고, PAH LIF 신호가 매연보다 연료 노즐에 더 가까운 부분에서 생성된다는 것을 알 수 있다. 매연이 생성되기 이전에 PAH는 최대치를 이루며 매연 생성단계에서 감소한다는 것을 알 수 있는데, 이 결과는 형광신호를 방출하는 PAH 화학종들이 매연생성과 밀접한 관계를 갖고 있음을 보여주고 있다. DME 화염에서도 PAH LIF와 LII의 이미지를 측정하였는데, DME 화염에서의 PAH와 매연의 생성은 거의 발생하지 않았기 때문에 각각의 이미지를 측정할 수가 없었다. 이는 DME 연료의 분자구조상 매연 생성지역에서 충분히 많은 양의 산소를 공급할 수 있기 때문에 PAH와 매연이 충분히 성장하지 못하고 산화되기 때문이다.

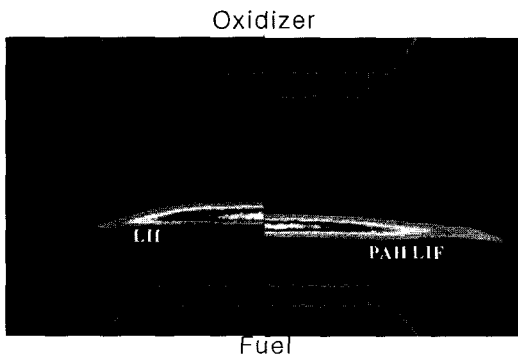


Fig. 1 Typical images of LII and PAH LIF for counterflow diffusion flame of ethylene

최근 매연의 생성 메커니즘을 규명하기 위한 일련의 과정의 하나로 에틸렌 화염에 프로판을 혼합하는 실험이 수행되었다.⁷⁾ 에틸렌 화염에 소량의 프로판이 혼합될 때 PAH와 매연의 생성이 급격히 증가함이 보고되었는데, 이 결과는 PAH가 생성되는

지역에서 프로판의 열분해 과정으로 다량의 메틸(CH_3)이 생성될 수 있기 때문으로 해석되었다. 생성된 메틸은 에틸렌 화염에 다량으로 존재하는 아세틸렌과 반응하여 프로파길을 생성할 수 있어 초기 벤젠고리 형성과 PAH 성장과정에서 중요한 역할을 수행할 수 있기 때문에 프로판이 추가적으로 공급될 때 PAH와 매연의 생성을 증가시킬 수 있다. 또한 탄화수소 연료에 소량의 산소를 첨가하였을 때에도 매연 및 PAH가 증가하는 특성이 관찰된 바 있다.

DME 화염은 PAH와 매연을 거의 생성하지 않았고, 이 때문에 최근까지 산업용 연소 기기에서 청정 연료로서 주목받아 왔다. 그러나, DME는 분자 구조상 열분해 과정에서 다량의 메틸 화학종을 공급할 수 있고, 앞서 언급했듯이 매연 생성에서 메틸 화학종의 중요성을 고려한다면 혼합조건에 따라 오히려 매연과 PAH의 생성을 증가시킬 수 있는 가능성이 있다. 또한 DME는 합산소 연료로서 열분해 과정중에 산소 원자가 간여하게 되므로 소량의 산소첨가 효과를 가져올 수 있다. 따라서 DME를 연료로 하는 화염에서 매연의 생성을 제어하기 위해서는 DME와 매연생성특성의 상관관계에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하다.

DME 연료의 매연생성 특성을 규명하기 위하여 대항류 에틸렌 화염에 DME의 혼합에 따른 중심선 상에서의 PAH LIF와 LII 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 β 는 에틸렌과 DME의 혼합연료에서 DME의 비율로 정의하였다. 에틸렌 화염에 DME가 혼합될 때 PAH와 매연 생성이 크게 변화하였는데, 특히 순수 에틸렌 화염 ($\beta = 0$)에 비해 DME가 혼합된 경우 보다 많은 양의 PAH와 매연이 생성됨을 알 수 있다. 혼합비에 따른 PAH와 매연의 생성특성을 보다 명확하게 비교하기 위하여 최대 PAH LIF 및 LII의 신호를 Fig. 3에 나타내었는데, PAH와 매연의 생성은 DME 혼합에 따라 급격히 증가하다가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 에틸렌 화염에 소량의 DME ($\beta = 0.03$)가 공급됨에도 불구하고 PAH와 매연의 생성이 각각 70%와 25% 이상 증가하였고, $\beta = 0.1$ 정도에서 최대의 PAH와 매연의 생성을 나타낸 후 감소함을 알 수 있다. 순수 DME 화염 ($\beta = 1$)에서 PAH와 매연의 생성이 거의 발생하지 않는다는 점

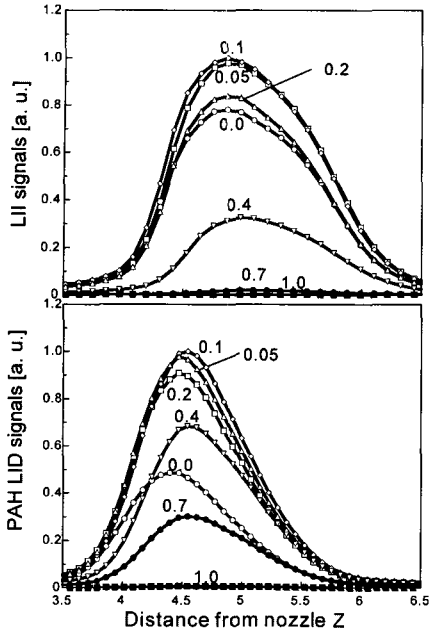


Fig. 2 Profiles of LII and PAH LIF signals for various mixture ratios of ethylene and DME

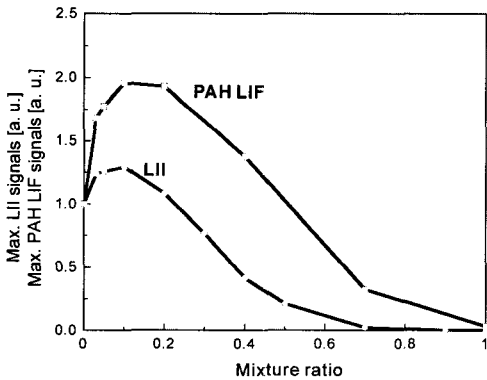


Fig. 3 Maximum signals of PAH LIF and LII at the centerline of the counterflow diffusion flame as a function of mixture ratios

을 고려하면, 이 결과는 청정연료로서 DME 연료의 이용에 있어 특히 탄화수소연료와 혼합연료로 사용하는 경우 주의를 필요로 한다는 것을 시사하고 있다.

에틸렌 화염에 DME가 혼합된 경우 혼합비에 따라 PAH와 매연의 생성이 급격히 증가하였는데, 이를 규명하기 위해서 PAH와 매연의 생성에 중요한 화학종인 메틸, 아세틸렌, 그리고 프로파질의 생성 특성에 대한 수치해석을 수행하였다.

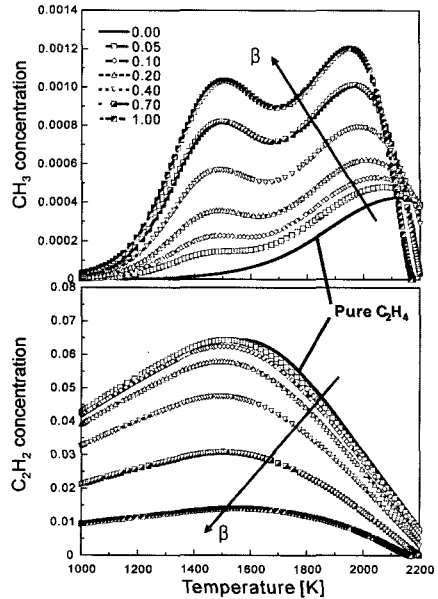


Fig. 4 Calculated CH_3 and C_2H_2 concentrations for various mixture ratios as a function of temperature

DME 혼합에 따른 메틸과 아세틸렌의 농도를 반응 지역의 온도를 축으로 하여 Fig. 4에 나타내었다. PAH의 생성 및 성장 반응은 $1000 < T < 1600$ K의 온도 조건에서 활발하기 때문에 각 화학종에 대한 생성특성은 이 영역을 기준으로 하여 해석하였다.⁷⁾ 순수 에틸렌 화염에서 메틸 라디칼의 농도는 PAH의 생성지역에서 매우 낮게 유지되며, 반면에 아세틸렌은 상대적으로 높은 농도를 유지하고 있다. 에틸렌 화염에 DME를 혼합했을 때 나타나는 중요한 특징은 PAH 생성지역에서 메틸의 농도가 급격히 증가하고, 반면 아세틸렌의 농도는 감소한다는 점이다. 특히 순수 에틸렌 화염($\beta = 0$)인 경우 PAH 생성지역에서 거의 생성되지 않았던 메틸이 소량의 혼합비($\beta = 0.05$)에서도 급격히 증가하고 아세틸렌은 거의 일정한 농도를 유지하였는데, 이는 혼합된 DME에 의해 메틸의 생성이 급격히 증가할 수 있음을 보여주고 있다.

DME의 혼합비가 증가할수록 2000 K 부근의 고온지역과 더불어 저온의 PAH 생성지역에서도 메틸 화학종의 생성이 최대가 되는 영역이 존재하였고, 순수 DME 화염($\beta = 1$)으로 갈수록 메틸의 생성은 두 영역 모두에서 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편, DME의 혼합비가 증가함에 따라 아세틸렌의 농도는 급격히 감소함을 알 수 있는데, 혼합비가 증가할수록 비록 메틸의 농도는 증가하지만 아세틸렌과 관련된 HACA 반응이 활성화될 수 없기 때문에 PAH와 매연의 생성은 감소할 수밖에 없다. 따라서 이 결과는 PAH 생성지역에서 추가적으로 공급된 메틸은 메틸화합물 자체로는 PAH와 매연의 생성을 촉진시킬 수 없지만 아세틸렌이 풍부한 화염에 공급될 경우 PAH와 매연의 생성을 증가시킬 수 있음을 보여주고 있다.

에틸렌 화염에 DME 혼합에 따른 메틸과 아세틸렌의 생성경로를 분석하기 위하여 혼합비 $\beta = 0, 0.05$ 와 0.4 에서 생성율을 반응 지역의 온도를 축으로 하여 Fig. 5에 나타내었다. 전체 메틸의 생성 경로에 의하면, 순수 에틸렌 화염에서의 메틸은 1900 K 이상의 고온 지역에서 $H + CH_4 = CH_3 + H_2$ 의 반응으로 생성되고 저온지역으로 확산된 후 소멸되고 있음을 보여주고 있다. 에틸렌 화염에 DME가 혼합될 때 나타나는 가장 중요한 특징은 고온지역에서 $H + CH_4 = CH_3 + H_2$ 의 반응과 더불어 저온지역에서 $C_2H_6O = CH_3 + CH_3O$ 과 $C_2H_5O = CH_3 + CH_2O$ 의 반응에 의해 메틸의 생성이 활성화되고, 이로 인해 에틸렌 화염과는 다르게 저온지역에서도 메틸의 생성

이 순 생성을 보이고 있다는 점이다. DME의 혼합비가 증가할수록 저온지역과 고온지역 모두에서 메틸의 생성은 급격히 증가하고 있으며, 이는 메틸의 농도가 DME의 혼합비에 따라 급격히 증가했던 점을 잘 설명해 주고 있다. 한편 아세틸렌의 생성 경로에서는 모든 경우에 $H + C_2H_2 (+M) = C_2H_3 (+M)$ 의 반응이 우세하였는데, DME의 혼합비가 증가하면 에틸렌의 농도가 감소하고, 이로 인해 C_2H_3 의 농도가 감소하기 때문에 이 반응에 의한 아세틸렌의 생성은 감소하고 있음을 보여주고 있다.

DME 혼합에 따른 프로파길의 생성특성을 규명하기 위하여 계산된 프로파길의 농도를 반응 지역의 온도를 축으로 하여 Fig. 6에 나타내었다. PAH 생성지역에서 프로파길의 농도는 혼합비 $\beta = 0.4$ 까지 급격히 증가하다가 이후 감소하는 특징을 보여주고 있다. 이 결과는 에틸렌 화염에 혼합된 DME는 메틸뿐만 아니라 초기벤젠고리 생성 및 PAH 성장에 중요한 화학종으로 알려져 있는 프로파길의 생성을 증가시키고 있음을 보여주고 있다.

DME 혼합에 따른 프로파길의 생성 경로를 파악하기 위하여 혼합비 $\beta = 0$ 와 0.05 에서 프로파길의 생성율을 반응지역의 온도를 축으로 하여 Fig. 7에 나타내었다. 전체 프로파길의 생성 경로는 이 영역

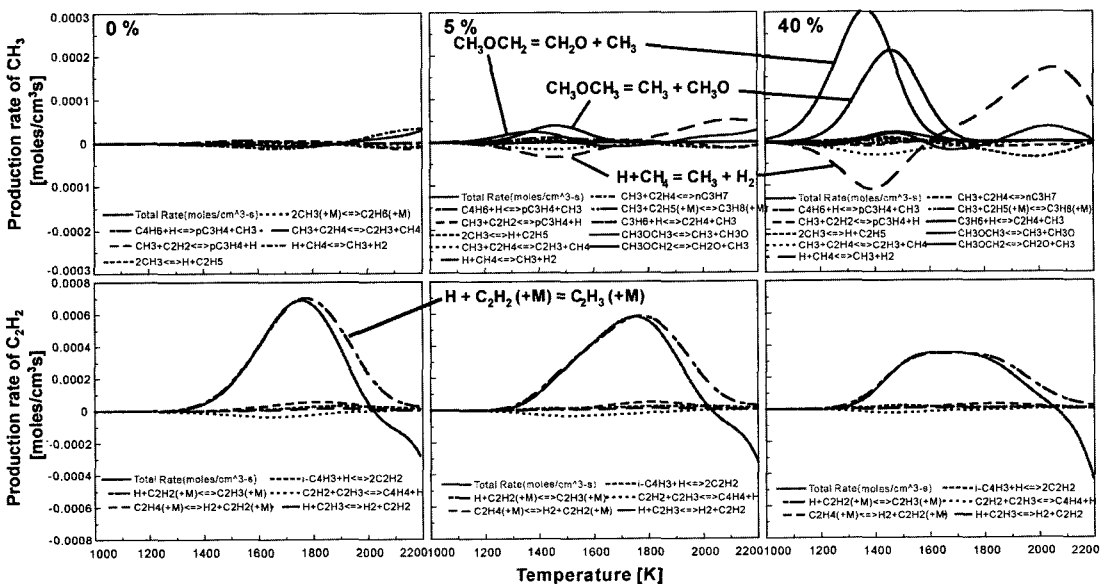


Fig. 5 Production rates of CH_3 and C_2H_2 at the mixture ratios of 0, 0.05, and 0.4 as a function of temperature

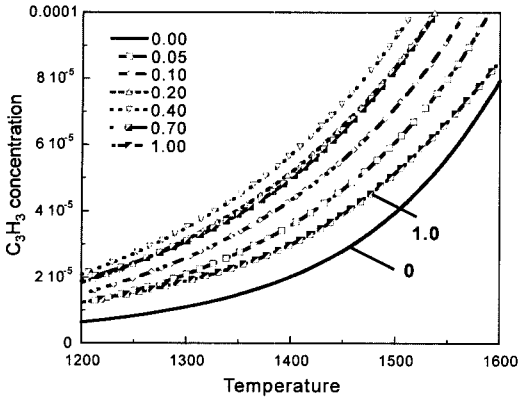


Fig. 6 Calculated C_3H_3 concentrations for various mixture ratios as a function of temperature

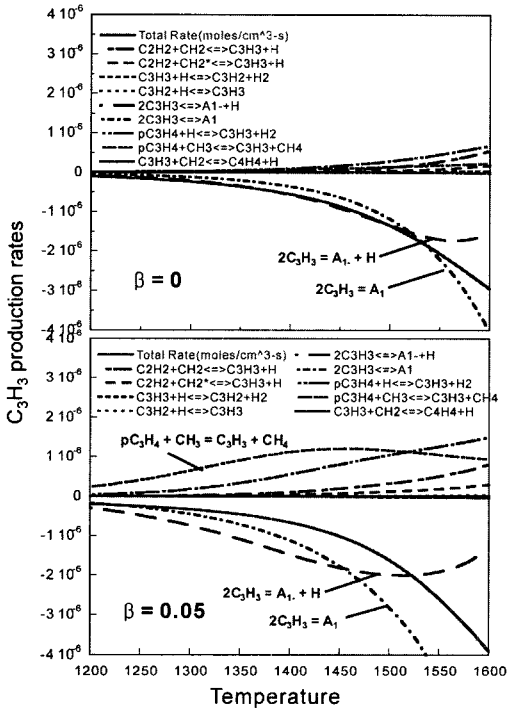


Fig. 7 Production rates of C_3H_3 at the mixture ratio of 0 and 0.05 as a function of temperature

에서 소멸반응이 우세하지만 순수 에틸렌 화염과 비교할 때 DME 혼합화염에서는 메틸 화학종과 관련된 $pC_3H_4 + CH_3 = C_3H_3 + CH_4$ 의 반응에 의한 프로파길 생성이 PAH 생성지역에서 활성화 되었고, 이 때문에 혼합화염에서의 프로파길 생성이 PAH 생성지역에서 증가할 수 있다는 것을 보여준다.

본 연구결과는 DME 화염에서는 초기 열분해 과정으로 PAH 생성지역에서 많은 양의 메틸을 공급할 수 있을 수 있다는 것을 보여주고 있다. 순수 DME 화염은 비록 PAH와 매연의 생성이 거의 발생하지 않았지만, 많은 양의 메틸을 생성할 수 있기 때문에 에틸렌과 같이 연료의 열분해 과정에서 많은 양의 아세틸렌을 공급할 수 있는 화염에 공급될 경우 오히려 매연과 PAH를 급격히 증가시킬 수 있는 특징이 나타남을 규명하였다. 특히 생성된 메틸은 PAH 생성지역에서 초기벤젠고리 생성과 PAH 성장반응에 중요한 화학종인 프로파길의 생성을 활성화 할 수 있고, 또한 최근 PAH 성장에 중요한 화학종으로 알려져 있는 것을 고려할 때, PAH 및 매연의 생성에 중요시 되어야 할 것이다.

4. 결론

DME의 매연 생성 특성을 규명하기 위하여 에틸렌의 대항류 확산화염에 DME를 혼합하는 실험 및 수치 해석을 수행하였으며, 결과는 다음과 같다.

- 1) 순수 DME 화염에서는 매연과 PAH의 생성이 거의 발생하지 않았고, PAH 생성지역에서 많은 양의 메틸 화학종을 생성할 수 있었다.
- 2) 에틸렌 화염에 DME 혼합에 따라 매연과 PAH의 생성 모두에서 혼합비 $\beta = 0.1$ 까지 급격히 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 DME의 열분해 경로인 $C_2H_6O = CH_3 + CH_3O$ 과 $C_2H_5O = CH_3 + CH_2O$ 의 반응에 의해 PAH 생성지역에서 에틸렌 화염에서는 상대적으로 거의 생성되지 않았던 메틸 화학종을 공급할 수 있기 때문이다.
- 3) DME 혼합과 함께 생성된 메틸은 $pC_3H_4 + CH_3 = C_3H_3 + CH_4$ 의 반응 경로에 의해 PAH 성장지역에서 프로파길을 공급할 수 있음이 규명되었고, 이와 함께 PAH 성장에 중요하기 때문에 PAH 및 매연 생성에 중요시되어야 함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음(KRF-2003-041-D00116).

References

- 1) Randall L. Vander Wal, K. A. Jensen and M. Y. Choi, "Simultaneous Laser-Induced Emission of Soot and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Within a Gas-Jet Diffusion Flame," *Combust. Flame* Vol.109, pp.399-414, 1997.
- 2) I. Glassman, "Soot Formation in Combustion Process," 22th Proc. Combust. Inst., pp.295-311, 1988.
- 3) M. Frenklach, D. W. Clary, C. William, J. R. Gardiner, and E. S. Stephen, "Detailed Kinetic Modeling of Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene," 20th Proc. Combust. Inst., pp.887-901, 1984.
- 4) A. D'Anna, A. Violi, and A. D'Alessio, "Modeling the rich combustion of aliphatic hydrocarbons," *Combust. Flame*, Vol.121, pp.418-429, 2000.
- 5) J. A. Miller, "Theory and Modeling in Combustion Chemistry," 26th Proc. Combust. Inst., pp.461-480, 1996.
- 6) N. M. Marinov, W. J. Pitz, C. K. Westbrook, A. E. Lutz, A. M. Vincitore and S. M. Senkan, "Chemical Kinetic Modeling of a Methane Opposed-Flow Diffusion Flame and Comparison to Experiments," 27th Proc. Combust. Inst., pp.605-613, 1998.
- 7) S. S. Yoon, S. M. Lee and S. H. Chung, "Effect of Mixing Methane, Ethane, Propane and Propene on the Synergistic Effect of PAH and Soot Formation in Ethylene-Base Counterflow Diffusion Flames," 30th Proc. Combust. Inst., To be published.
- 8) J. B. Hansen, B. Voss, F. Joensen and I. D. Siguroardottir, "Laser Scale Manufacture of Dimethyl Ether - A New Alternative Diesel Fuel from Natural Gass," SAE 950063, 1995.
- 9) D. Gill, and H. Ofner, "Dimethyl Ether - A Clean Fuel for Transportation," SAE 990959, 1999.
- 10) L. A. Melton, *Applied Optics*, Vol.23, pp.2201-2208, 1984.
- 11) Randall L. Vander Wal, *Applied Optics*, Vol.35, No.33, pp.5548-6559, 1996.
- 12) Z. Qin, V. V. Lissianski, H. Yang, S. W. C. Gardiner, S. G. Davis and H. Wang, 28th Proc. Combust. Inst., pp.1663, 2000.
- 13) S. L. Fischer, F. L. Dryer and H. J. Curran, "The Reaction Kinetics of Dimethyl ether. I: High-Temperature Pyrolysis and Oxidation in Flow Reactors," *Int. J. Chem. Kinet.*, Vol.32, pp.713-740, 2000.
- 14) H. J. Curran, S. L. Fischer and F. L. Dryer, "The Reaction Kinetics of Dimethyl ether. II: Low-Temperature Oxidation in Flow Reactors," *Int. J. Chem. Kinet.*, Vol.32, pp.741-759, 2000.
- 15) S. D. Lee and S. H. Chung, "On the Structure and Extinction of Interacting Lean Methane/Air Premixed Flames," *Combust. Flame*, Vol.98, p.80, 1994.