

매연입자 온도 측정에 의한 확산화염의 매연생성 특성 해석

이 원 남* · 정 용 현**

Analysis of Soot Formation Characteristics in Diffusion Flames with Soot Particle Temperature Measurement

Wonnam Lee and Younghyun Chung

Key Words: 매연(Soot), 확산화염(Diffusion flame), 이색법(Two-color pyrometry),
매연입자온도(Soot Particle Temperature)

Abstract

Soot particle temperatures in co-flow diffusion flames have been measured using a two-color pyrometry at the pressure of 0.2 MPa(2 atm). The measured soot particle temperatures along with the integrated soot volume fractions are analyzed to understand soot formation characteristics. At 0.2 MPa, the addition of small amount of air into ethylene do not change the soot particle temperature in soot formation regions. This result showed that the increase of soot formation with addition of air is mostly due to the chemical effect of the added air, such as the increased role of C3 chemistry during the early stage of soot inception process. The addition of sufficient air into ethylene, however, changes soot particle temperatures and the understanding of soot formation characteristics becomes complicated. Measured soot particle temperatures also showed that there is no significant temperature effect for the synergistic effect of ethylene/propane mixture on soot formation.

1. 서 론

연료에 대한 산화제 및 희석제 첨가에 따른 확산화염의 매연생성 특성 변화는,

* 단국대학교

** 단국대학교 대학원

연료 희석 효과, 화염온도 변화 효과 및 연료에 포함된 산화제가 매연생성 메카니즘에 미치는 화학적 효과 등으로 알려져 있다. 연료에 첨가된 희석제는 연료 분율의 감소에 따른 매연생성 억제 효과 이외에도 조건에 따라 화염온도 감소에 따른 매연생성율의 감소 효과를 가져오게 된다. Axelbaum and Law⁽¹⁾와 Gülder and Snelling⁽²⁾ 등은 에틸렌 확산화염을 이용하여 매연 생성에 대한 연료

회석 효과와 화염온도 변화 효과를 정량적으로 비교하였으며, 연료 물분율이 0.3 이상이면 연료 회석 효과가 상대적으로 더 중요하다고 하였다. 그러나 화염의 매연생성 특성과 매연입자/화염 온도를 함께 측정하여 분석한 예는 그리 많지 않다. Gülder and Snelling⁽²⁾은 프로판과 옥탄 화염을 이용한 실험에서 매연 생성에 대한 화염/매연입자의 온도 의존도가 알려진 것 보다 적음을 보여주었으며, Flower⁽³⁾는 1400 K 이하에서는 매연입자의 산화가 이루어지지 않는다고 하였다.

에틸렌 화염의 연료라인에 공기를 첨가하면 같은 유량의 질소를 첨가하는 경우보다 매연생성이 크게 증가하였으며, 연료에 첨가되는 공기의 역할은 매연생성 메카니즘의 변화로 이해되고 있다.⁽⁴⁾ 또한 에틸렌/프로판 확산화염에서 연료 혼합에 따른 매연발생 상승 효과가 나타났으며, 이는 매연입자 발단 단계의 PAH 생성 과정에서 C3 화학종의 역할로 설명되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ 그러나 에틸렌/프로판 혼합 연료에 공기가 첨가된 경우 매연발생 상승효과가 관찰되지 않았으며, 에틸렌 연료에 공기를 첨가하면 산화 메카니즘을 통하여 C3 화학종을 생성하고, 생성된 C3 화학종의 역할이 연료혼합에 의한 매연발생 상승 메카니즘과 중복되는 것을 알 수 있었다.^(6,8) 매연생성 메카니즘은 화염의 온도에 크게 영향을 받을 수 있다. 따라서 이와 같은 연료에 첨가되는 공기/산화제의 역할, 연료 혼합에 따른 매연 생성의 상승 효과를 충실히 이해하기 위해서는 화염/매연입자의 온도의 측정이 필요하며, 본 연구에서는 이색법을 이용하여 2 기압 조건에서 매연입자의 온도를 측정하고 이를 이용하여 매연생성 특성을 해석하였다.

화염/매연입자의 온도 측정에 널리 사

용되는 방법으로는 열전대, CARS, pyrometry 등이 있다. 이때 화염이 압력 용기에 들어있게 되면 열전대의 사용이 쉽지 않게 된다. 또한 CARS는 고가의 측정 장치가 필요하고 매연이 많이 발생하는 지역에서의 측정이 용이하지 않다고 알려져 있다. Pyrometry 및 이를 이용한 이색법은 온도 측정이 비교적 쉽고, 압력조건에서 온도 측정을 가능하게 하므로 디젤엔진, 확산화염 등에 적용되고 있으며, 비교적 만족할 만한 결과들을 보여주었다.^(3,9,10) 따라서 본 연구에서는 확산화염의 매연생성 특성을 알아보기 위하여 2 기압의 조건에서 이색법을 이용하여 매연입자의 온도를 측정하고, 이를 매연입자의 체적분율 측정 결과와 비교하였다. 이색법은 line-of-sight 측정으로 공간적인 해상도를 갖지 못하는 단점이 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 동축류 확산화염의 경우, 매연 생성 과정이 주로 화염의 높이에 따라 진행되며 반경 방향의 매연입자 분포와 온도 분포가 비교적 잘 알려져 있어 화염의 중심 축을 통과하는 line-of-sight로 측정된 이색법 온도는 화염의 매연생성 특성을 이해할 수 있게 한다.^(3,10)

이색법은 pyrometry의 응용으로, 복사율을 알지 못할 경우에도 각각 다른 파장에서 복사 신호를 이용하여 온도를 측정할 수 있다. 복사율은 일반적으로 파장에 따라 다르므로 파장에 따른 복사율의 변화를 고려하지 못하면 측정된 온도와 실제 온도 사이에 큰 차이가 발생하게 된다.⁽¹¹⁾ 그러나 매연입자의 경우 파장에 따른 복사율이 비교적 잘 알려져 있으며, 가시광선의 영역의 경우 Hottel and Broughton⁽¹²⁾이 실험적으로 제시한

$$\epsilon_\lambda = 1 - \exp\left(\frac{-KL}{\lambda^{1.38}}\right) \quad (1)$$

의 관계식을 이용할 경우 비교적 정확한 온도 측정이 가능하다고 알려져 있다. 여기에서 ϵ 은 복사율, λ 는 파장, K 는 흡수계수, L 은 측정두께를 나타낸다. 따라서 잘 알려진 KL factor법⁽⁹⁾을 적용하면 다음의 식으로부터 화염의 매연입자 온도를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \left(\frac{1}{\lambda_1 T_1} - \frac{1}{\lambda_2 T_2} \right) + \frac{1}{C_2} \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \ln \left| \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right| \quad (2)$$

여기에서 T 는 매연입자의 온도, λ_1 과 λ_2 는 각각의 파장, ϵ_1 과 ϵ_2 는 복사율, T_1 과 T_2 는 복사율을 1로 가정하고 측정된 온도를 나타낸다.

2. 실험 장치 및 방법

층류확산화염을 이용하여 매연입자의 온도를 측정하고, 이 결과를 이용하여 연료 혼합에 따른 확산화염의 매연생성 상승효과와 공기 첨가에 따른 매연 생성 메카니즘의 변화를 해석하였다. 압력용기 내에 위치한 동축류 버너를 이용하여 2 기압 조건에서 축대칭 층류확산화염을 형성하였으며, 이때 사용된 동축류 버너 및 압력용기의 상세한 구조는 이전에 설명된 것과 같다.⁽¹³⁾ 이색법을 이용하여 화염의 중심 축을 통과하는 경로의 매연입자 평균온도를 측정하였다. Fig. 1은 실험장치의 구성도를 보여주고 있다.

복사광의 측정에는 CCD 카메라(Pulnix TM-6701AN), 550 nm와 750 nm의 narrow-band-pass 필터(10 nm FWHM), 50 mm 표준 lens(Nikkor)를 사용하였으며, CCD 카메라의 shutter 속도와 렌즈의 F number를 변화시켜 충분한 dynamic 범위를 갖도록 하였다. KL factor 법을 사용

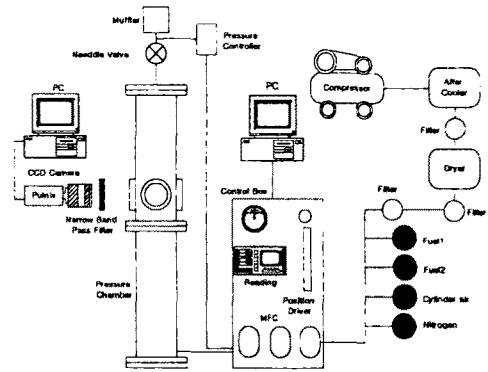


Fig. 1 Experimental setup

하기 위하여 한국표준과학연구원의 고온 흑연관 흑체로를 이용하여 카메라 및 영상처리장치의 복사광 신호와 온도의 관계를 얻었으며 그 결과를 Fig. 2에서 보여주고 있다.

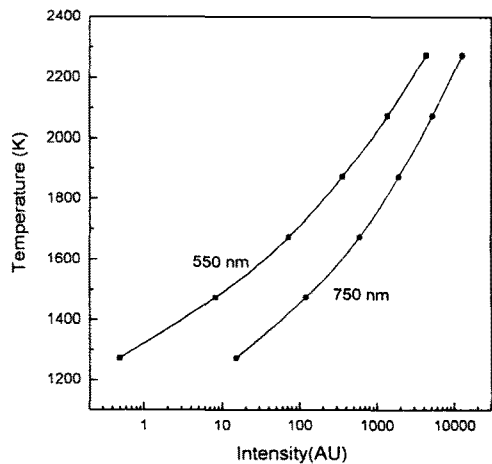


Fig.2 Calibration curve.

에틸렌 확산화염에 첨가하는 공기와 질소의 유량을 0 scc/sec에서 7.0 scc/sec 까지 변화시키면서 공기 및 질소의 첨가에 따른 매연입자의 온도 변화를 측정하였다. 혼합연료의 혼합비는 연료의 탄소

질량 흐름율을 일정하게 유지시킨 상태에서 연료라인에 투입되는 에틸렌과 프로판의 유량을 질량 흐름제어기로 변화시켰다. 연료의 혼합정도를 나타내기 위해서 연료에 포함된 프로판의 비율, x 를

$$x = \frac{\dot{m}_{C_3H_8}}{\dot{m}_{C_3H_8} + \dot{m}_{C_2H_4}} \quad (3)$$

로 정의하였으며, 여기에서 $\dot{m}_{C_3H_8}$ 은 프로판의 탄소 질량 흐름율, $\dot{m}_{C_2H_4}$ 은 혼합 연료의 탄소 질량 흐름율을 나타낸다. 본 연구에서는 x 값을 0 에서 1 까지 단계별로 조절하여 에틸렌 및 프로판의 탄소 비율을 조절하였다. 공기 첨가에 따른 혼합연료의 매연생성 특성변화 조사를 위한 실험에는 3.0 scc/s의 공기를 첨가한 조건에서 혼합연료의 조성비를 변화시켰다. 연료로는 C.P.급의 에틸렌(순도 99.5%)과 프로판(순도 99.5%)을 사용하였으며 첨가제는 질소(순도 99.9%)와 실린더 공기(순도 99.5%)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공기/질소 첨가에 따른 온도 변화

확산화염의 연료에 소량의 공기를 첨가하면 연료분율이 감소함에도 불구하고 매연의 생성이 증가한다. 이는 매연생성 초기단계의 PAH 생성 메카니즘의 특성으로 설명 될 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 2 기압의 조건에서 에틸렌 확산화염의 연료에 각각 공기와 질소를 첨가한 경우의 매연생성 특성 변화를 보여준다. 이때 생성되는 매연의 체적분율은 대기압 결과⁽⁴⁾와 비교하여 크게 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 2 기압의 경우에도 에틸렌 화염의 연료에 공기를 첨가하면

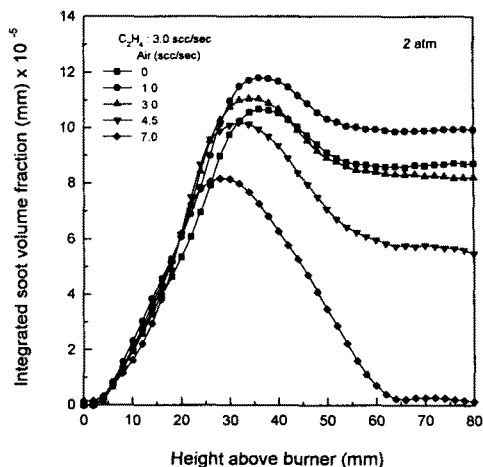


Fig.3 Integrated soot volume fraction with air addition at 0.2 MPa.

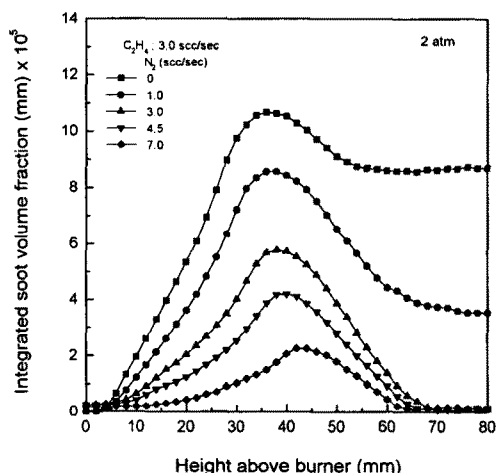


Fig.4 Integrated soot volume fraction with N₂ addition at 0.2 MPa.

화학적 효과에 따른 매연생성 증가가 이루어지는 것을 보여준다.

이와 같은 매연의 증가를 자세히 이해하기 위하여 같은 조건에서 이색법을 이용하여 화염의 높이에 따른 매연입자의 온도 변화를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 6 - Fig. 8과 같다.

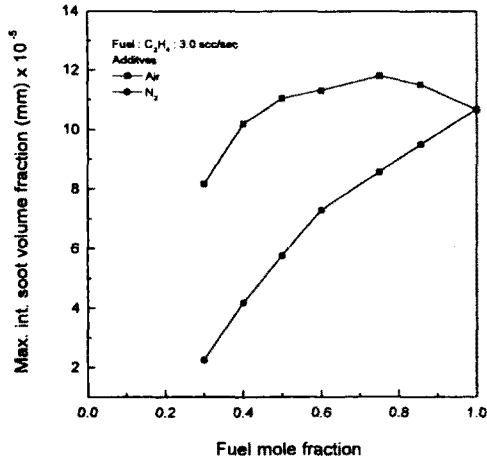


Fig. 5 The effect of air and N₂ addition into ethylene on soot formation.

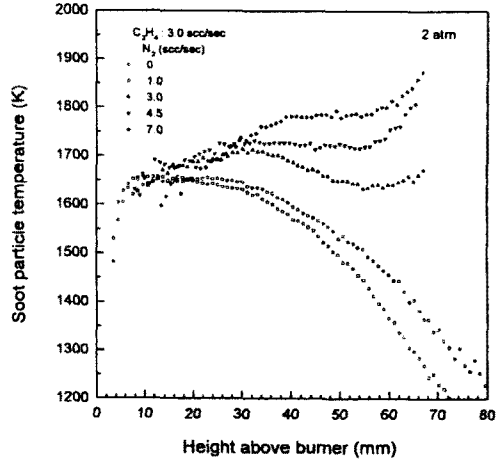


Fig. 7 Soot particle temperatures with N₂ addition into ethylene at 0.2 MPa.

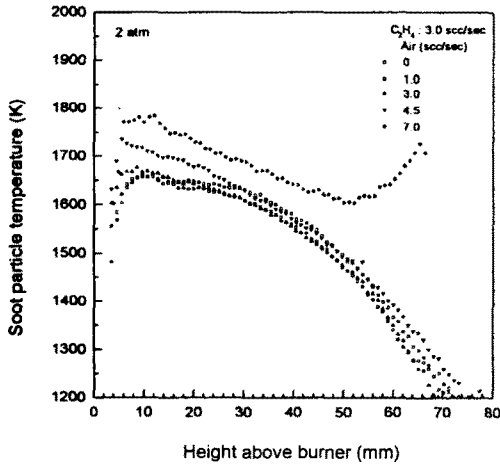


Fig. 6 Soot particle temperatures with air addition into ethylene at 0.2 MPa.

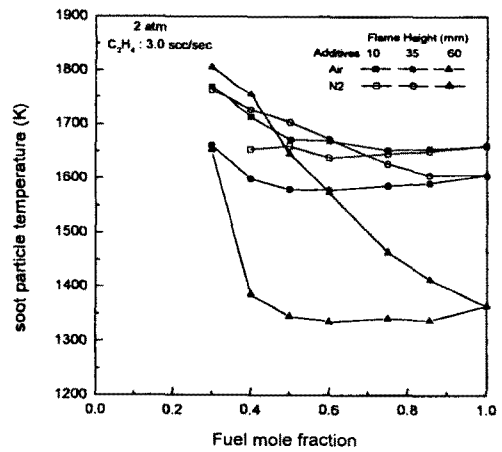


Fig. 8 The effect of air and N₂ addition on soot particle temperature.

Fig. 6은 공기의 첨가에 따른 매연입자 온도의 변화를 보여주고 있다. 대기압의 경우와는 달리 2 기압에서는 화염에서 생성되는 매연입자가 화염 밖으로 배출되게 된다. Fig. 3으로부터 연료에 공기가 7.0 scc/sec가 첨가되는 경우를 제외하고는 매연입자가 완전히 산화되지 않고 화염 밖으로 배출되는 것을 알 수 있으며, 또한 화염 높이 50-60 mm에서 매연의

산화가 정지하는 것을 알 수 있다. Fig. 6으로부터 매연의 산화반응이 정지하는 높이가 매연입자 온도 1400 K 전후에 해당한다는 것을 알 수 있으며, 이는 매연의 산화가 정지한다고 알려진 온도(3)와 일치한다.

Fig. 7은 연료에 질소를 첨가하는 경우에도 매연이 배출되지 않는 화염에서는 매연의 온도가 1600 K 이상을 유지하며,

매연이 배출되는 경우에는 55-65 mm의 높이에서 매연입자 온도가 1400 K에 도달하고 매연의 산화가 정지되는 것을 보여준다.

연료에 공기가 첨가되면(Fig. 6) 매연이 생성되기 시작하는 화염 하단에서 매연입자의 온도가 상승하며 매연생성율이 증가될 수 있다. 그러나 공기가 1.0 scc/sec 첨가된 경우에는 매연입자의 온도가 순수한 에틸렌과 전 영역에서 거의 일치하며, 따라서 소량의 공기가 첨가되어 증가한 매연 생성은 화학적 효과, 즉 C3 화학종의 역할 증가와 같은 매연 생성 메카니즘의 변화에 의한 것을 입증할 수 있었다. 질소가 첨가되면(Fig. 7) 화염의 높이 20 mm까지는 매연입자 온도가 질소 첨가에 따라 약간 낮아지지만 그 이후에는 오히려 크게 상승하였다. 그러나 매연생성은 연료물분율의 감소와 비례하여 줄어들며, 이는 매연입자가 산화되는 화염 상단 지역에서의 매연입자/화염의 온도는 매연생성과 크게 관련이 없다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 화염의 높이 10, 35, 60 mm에서의 공기와 질소 첨가에 따른 매연입자 온도의 변화를 보여준다. 화염의 하단(10 mm)에서는 공기/질소의 첨가에 따른 매연입자 온도의 변화가 크지 않지만, 화염의 중단(35 mm)에서는 질소의 첨가가 매연생성과 화염의 복사열 손실을 감소시켜 매연입자의 온도가 오히려 더 높은 것을 알 수 있다. 화염 상단(60 mm)의 온도는 매연생성량과 복사 열 손실에 큰 영향을 받으며 온도에 따른 화염의 매연 산화 특성을 반영하고 있다.

3.2. 연료혼합 및 공기첨가에 따른 온도변화

에틸렌 확산화염에 전체 탄소량을 일정하게 유지하면서 소량의 프로판을 첨가하면 매연생성 발달과정에서 C3 화학종에 의한 PAH 증가로 매연발생이 증가한다.^(5,6,8) 또한 에틸렌 연료에 첨가되는 공기도 일종의 산화반응 메카니즘을 통하여 C3 화학종을 생성하고, 생성된 C3 화학종은 열해리에 의해서 생성된 C2 화학종이 효과적으로 PAH 단계를 거쳐서 매연 입자를 생성하도록 돕게되어 동일한 메카니즘을 통하여 매연생성을 증가시키게 된다. 따라서 공기 첨가에 따른 매연 생성에 대한 C3 화학종의 역할은 연료혼합에 의한 매연발생 상승 메카니즘과 중복이 되는 것이 확인되었다.^(6,8) 그러나 이때 화염/매연입자의 온도 변화는 측정되지 않았으며 화염온도의 증가에 따른 매연 생성 특성의 변화 가능성에 대한 직접적인 검토가 이루어지지 않았다.

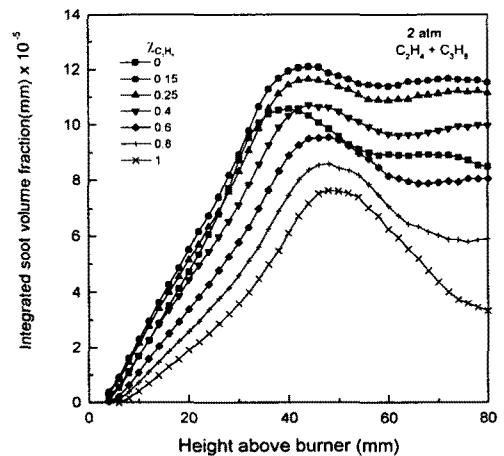


Fig.9 The integrated soot volume fraction of ethylene/propane flames at 0.2 MPa.

Fig. 9는 2 기압에서 에틸렌/프로판 혼합정도에 따른 매연 발생 특성을 보여주며, Fig. 10은 연료에 3.0 scc/sec의 공기

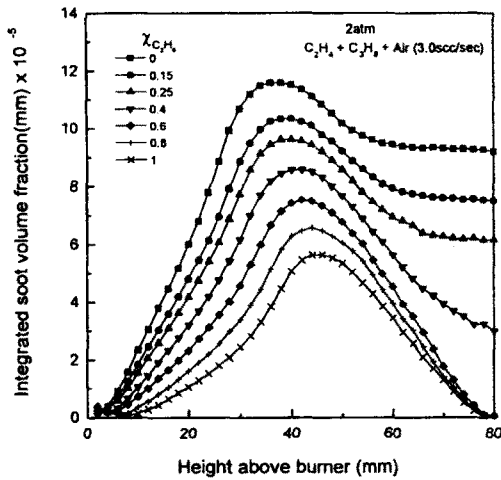


Fig.10 The integrated soot volume fraction of ethylene/propane/air flames at 0.2 MPa.

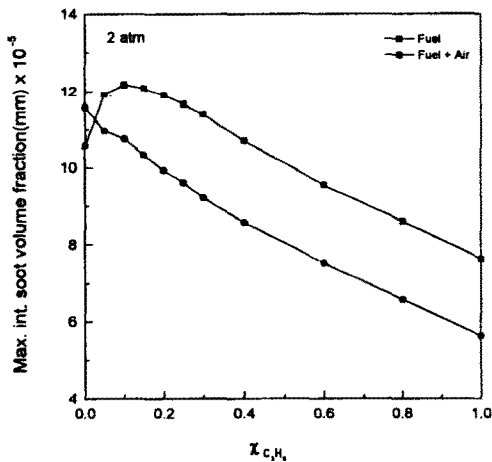


Fig.11 The effect of propane mixing into ethylene on soot formation.

를 첨가한 결과를 나타내고 있다. 이 결과를 비교하여 공기를 첨가한 경우 프로판 혼합에 따른 매연생성 상승 효과가 없음을 알 수 있다. Fig. 11은 프로판 혼합에 따른 적분된 매연체적분율(최댓값)의 변화를 나타내며 공기와 질소의 첨가 결과의 차이를 보여준다. Fig. 11로부터 에틸렌에 공기가 첨가되면 추가적인 프

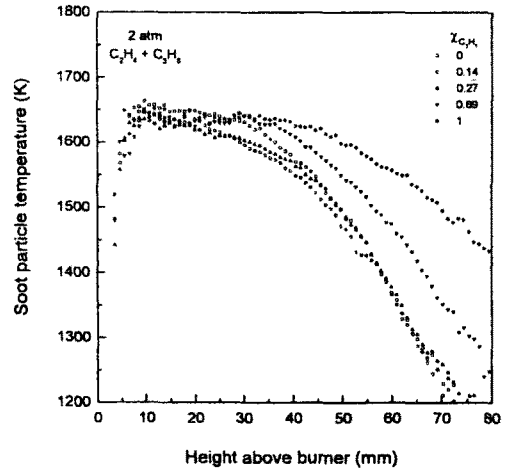


Fig.12 Soot particle temperatures of ethylene/propane flames.

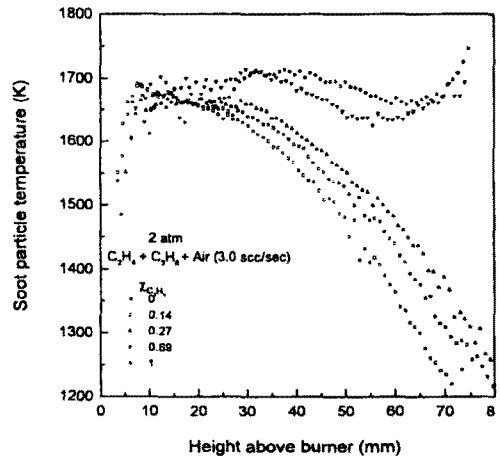


Fig.13 Soot particle temperatures of ethylene/propane/air flames.

로판의 혼합은 단지 선형적으로 매연발생을 감소시키는 것을 알 수 있다. 이 경우에 대한 온도 측정 결과를 Fig. 12 - Fig.14에 나타내었다.

Fig. 12에서 에틸렌에 소량의 프로판을 혼합하면 화염 전 영역에서 매연입자 온도가 큰 변화가 없거나 오히려 약간 낮아졌다. 따라서 연료의 혼합에 따른 매

연의 증가는 순수한 매연생성 메카니즘의 변화에 의한 것이며, 화염/매연입자의 온도 변화 효과가 아니라는 것을 입증할 수 있었다. Fig. 13은 공기를 첨가 경우에는 프로판의 혼합에 따라 화염 높이 20 mm 이후에는 화염의 온도가 오히려 상승하는 것을 보여주며, 프로판의 혼합에 따른 매연생성 감소는 에틸렌 몰분율의 감소로 매연생성이 선형적으로 줄어들기 때문이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 화염의 높이 10, 35, 60 mm에서 에틸렌/프로판 혼합 화염과 에틸렌/프로판/공기(3 scc/sec) 혼합 화염의 혼합 연료 프로판 몰분율에 대한 매연입자의 온도 변화를 보여주고 있다. 화염의 하단(10 mm)에서는 혼합연료에 공기를 첨가하면 매연입자 온도가 20 K 정도 상승하지만 두 경우 모두 프로판 몰분율에 따른 온도 변화는 매우 작다. 화염의 중단(35 mm)과 상단(60 mm)에서는 공기의 첨가로 매연입자의 온도가 크게 증가하며, 또한 혼합되는 프로판이 증가로 매연입자의 온도가 크게 상승하였다.

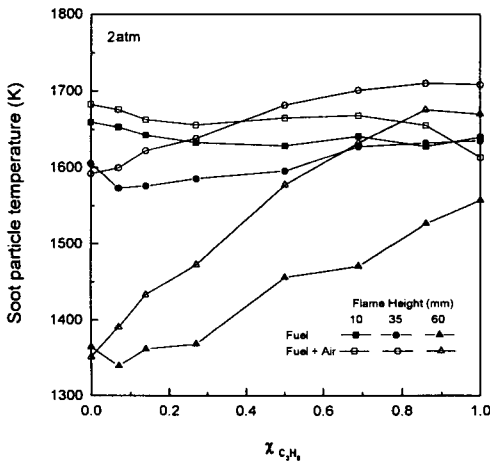


Fig.14 The effect of fuel mixture on soot particle temperature.

그러나 이와 같은 온도의 상승이 발생하는 조건에서는 매연 생성이 감소하였으며, 에틸렌에 혼합되는 프로판과 에틸렌에 첨가되는 소량의 공기에 의한 매연 생성 증가는 매연생성 발달과정에서 C3 화학종에 의한 PAH 증가의 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 공기 첨가에 따른 매연 생성에 대한 C3 화학종의 역할은 연료혼합에 의한 매연생성 증가 메카니즘과 동일하며 온도 변화에 의한 영향이 적음을 알 수 있었다.

4. 결론

동축류 에틸렌 확산화염에서 연료에 소량의 공기를 첨가할 경우 매연입자 온도의 변화가 거의 없었으며, 이때 증가하는 매연은 대부분 화학적 효과임을 알 수 있었다. 첨가되는 공기량이 증가하면 화염하단의 온도가 상승하며 이에 따른 매연생성 특성 변화가 기대된다. 화염상단 지역에서의 화염/매연입자 온도는 (1) 매연을 배출하는 경우에는 복사열 손실에 영향을 받으며 매연생성량이 매연입자의 온도를 결정하지만 (2) 매연입자가 배출되지 않는 화염에서는 매연생성량과는 크게 관계가 없고 단지 화염의 매연입자 산화 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.

연료 혼합에 따른 매연의 증가는 순수한 매연생성 메카니즘의 변화에 의한 것이며, 화염/매연입자의 온도 변화 효과가 아니라는 것을 입증할 수 있었다. 또한 공기 첨가에 따른 매연 생성에 대한 C3 화학종의 역할은 연료혼합에 의한 매연생성 증가 메카니즘과 동일하며 온도 변화에 의한 영향이 아님을 알 수 있었다.

후기

이색법을 이용한 온도측정과 관련하여 도움을 주신 한국표준과학연구원의 박승남 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Axelbaum, R.L., and Law, C.K., 1990, "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1517-1523.
- (2) Gülder, O. L., and Snelling, D. R., 1993, "Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 92, 115-124.
- (3) Flower, W. L., 1989, "Soot Particle Temperatures in Axisymmetric Laminar Ethylene-Air Diffusion Flames at Pressures up to 0.7 MPa," *Combustion and Flame*, Vol. 77, pp. 279-293.
- (4) 이원남, 1998, "동축류 확산화염의 매연생성에 미치는 연료에 첨가된 산화제의 영향," 한국연소학회지 제3권 제1호, pp. 11-19.
- (5) 강희곤, 1997, "층류 확산화염의 매연생성에 관한 실험적 연구-연료/공기, 연료 혼합 및 압력의 영향," 석사학위논문, 단국대학교.
- (6) 김성기, 1998, "연료혼합 및 공기첨가에 따른 매연생성 메카니즘 변화에 관한 실험적 연구," 석사학위논문, 단국대학교.
- (7) Hwang, J. Y., Lee, w., Kang, H. G., and Chung, S. H., "Synergistic Effect of Ethylene-Propane Mixture on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, 114, pp. 370-380.
- (8) Hwang, J. Y., Chung, S. H., and Lee, W., 1998, "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames Effects of Oxygen and Propane Addition on Soot Formation in Counterflow Ethylene Flames and the Role of C₃ Chemistry," Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1531-1538.
- (9) 이태원, 황성목, 정성식, 하종률, 1995, "이색법을 이용한 화염온도와 soot 생성과의 관계 연구," 1995년도 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp. 728-732.
- (10) Gülder, O. L., 1992, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elevated Temperatures," *Combustion and Flame*, 88, pp. 74-82.
- (11) 한재원, 1999, "적외선 복사온도 이론 및 측정," 1999년도 대한기계학회 추계열공학부문 학술대회.
- (12) Hottel, H. C. and Broughton, F. P., 1932, *Industr. Engng. Chem. Anal. Edn.*, 4, 166.
- (13) 이원남, 1998, "층류 확산화염에서의 PAH 및 매연생성에 대한 압력의 영향," 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제 10호, pp. 1445-1453.