

## 동축류 확산화염의 매연생성에 미치는 연료에 첨가된 산화제의 영향

이 원남\*

### Effects of Oxidant Addition to Fuel on Soot Formation of Laminar Diffusion Flames

Wonnam Lee\*

Key Words : Soot Formation, Diffusion Flame, Oxidant Addition

#### ABSTRACT

The influence of oxidant addition on soot formation is investigated experimentally with ethylene, propane and mixture fuel co-flow diffusion flames. Oxidant addition into fuel shows the increase of integrated soot volume fractions for ethylene, ethylene/ethane and ethylene/methane mixture flames. However, the increase of integrated soot volume fraction with oxidant addition was not significant for propane and ethylene/propane mixture flames. This discrepancy is explained with  $C_2$  and  $C_3$  chemistry at the early stage of soot formation process. The oxidant addition increases the concentration of  $C_3H_3$  in the soot formation region, and therefore, enhances soot formation process.

A new soot formation rate model that includes both dilution effect and chemical effect of oxygen is suggested to interpret the increase of integrated soot volume fractions with oxidant addition into ethylene. Also, the role of adiabatic flame temperature for the chemical effect of oxygen addition into fuel was reviewed. The influence of oxidant or diluent addition into fuel on soot formation process are the fuel dilution effect, the adiabatic flame temperature altering effect and/or the chemical effect of oxygen. Their relative importance could change with fuel structure and adiabatic flame temperature.

#### 1. 서론

산업용 연소시스템에서 요구되는 연소특성이 점차 복잡해지고 연소과정에서 발생하는 대기오염 문제가 심각해지면서 목적에 맞는 연소특성을 얻기 위한 다양한 연소 제어 기술이 연구되어왔다. 최근에는 연료에 산화제를 첨가하여 열 발생률을 증가시키거나 또는 희석제를 사용하여 화염의 온도를 제어하고, 배기가스 및 매연배출 특성을 개선하는 방법이 시도되고 있다. 현재 사용되는 많은 연소시스템은 가스 또는 분무확산화염을 이용하고 있으며, 이때 발생하는 매연입자는 연소시스템의 매연배출 특성뿐만 아니라 연소장치의 효율 및 수명에도 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 연료에 대한

산화제 및 희석제의 첨가는 확산화염의 매연생성 특성에도 영향을 주게되어 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 연료 희석 효과, 화염온도 변화 효과 및 연료에 포함된 산화제가 매연생성 메커니즘에 미치는 화학적 효과 등에 대한 많은 기초 연구가 수행되어왔다.<sup>(1-9)</sup> 현재까지 알려진 바로는 연료에 첨가된 희석제는 연료 몰분율의 감소에 따른 매연생성 억제 효과 이외에도 조건에 따라 화염온도 감소에 따른 매연생성율의 감소 효과를 가져오게 된다. Axelbaum and Law<sup>(4)</sup> 와 Gülder and Snelling<sup>(6)</sup> 등은 에틸렌 확산화염을 이용하여 매연생성에 대한 연료 희석 효과와 화염온도 변화 효과를 정량적으로 비교하였으며, 연료의 몰분율이 0.3 이상에서는 연료 희석 효과가 상대적으로 더 중요하다고 하였다.

\* 정회원, 단국대학교 기계공학과

연료에 산화제가 첨가되면 확산화염의 매연생성 특성은 첨가된 산화제의 화학적 효과가 추가되어 매우 복잡하게 된다. 에틸렌 확산화염을 사용한 실험적 연구는 에틸렌 확산화염에서 연료에 소량의 산소를 첨가하면 매연생성이 증가하는 것을 보여주었다.<sup>(2,3)</sup> Hura and Glassman<sup>(3)</sup>은 에틸렌에 첨가된 소량의 산소가 열해리 지역에서 H 라디칼의 농도를 증가시키고 따라서 열해리 반응물과 매연생성의 증가가 이루어진다고 설명하였다. 그러나 최근의 연구 결과는<sup>(10)</sup> 연료에 산소가 첨가되면 열해리 지역에서 O 라디칼에 의해 C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>의 생성이 증가하여 매연생성 초기 단계의 벤젠고리와 PAH 농도를 증가시키고 궁극적으로 매연생성을 증가시키는 메커니즘을 제시하였다.

연료에 첨가된 산소는 화염온도를 상승시키므로, 산화제 첨가에 따른 연료 회석 효과, 화염온도의 변화 및 산소에 의한 매연생성 메커니즘의 변화 등이 복합적으로 발생하며, 매연 생성에 대한 산화제의 영향을 정량적으로 평가하기가 어렵게 된다. Gülder<sup>(7)</sup>는 연료와 산화제를 예열하는 방법으로 단열화염 온도를 2400 K 로 일정하게 유지하면서 연료에 산소를 첨가하여 실험을 수행하였으며, 에틸렌뿐만 아니라 프로판 확산화염도 첨가된 산소에 의하여 매연생성율이 증가함을 보여 주었다. 그러나 Hura and Glassman<sup>(3)</sup> 및 Du et al.<sup>(9)</sup>의 실험 결과는 프로판에 소량의 산소를 첨가해도 매연생성율은 질소로 회석한 경우와 차이가 거의 없음을 보여주었다. 이러한 상반된 결과들은 산화제의 화학적 효과는 화염온도에 따라 다르게 나타날 수 있음을 시사하고 있다. 비록 Gülder<sup>(7)</sup>의 실험이 일정한 단열화염온도에서 수행되었지만, 연료 및 공기의 예열로 초기온도가 높으므로 설정된 단열 화염온도가 실제 화염 보다 높은 조건에서 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 산화제로 공기를 사용하여, 연료의 초기온도뿐만 아니라 연료에 첨가되는 공기의 유량에 관계없이 항상 단열화염온도를 일정하게 유지시키면서, 확산화염의 매연생성에 미치는 산화제/산소의 영향을 알아보고자 한다. 공기 중에는 산소 이외에도 질소가 포함되어 있어 산화제의 영향이 회석 효과와 함께 나타나게 된다. 그러나 산소 첨가의 경우에도 연료의 물분율을 낮추는 회석 효과가

포함되고, 또한 질소의 회석효과는 비교적 잘 알려져 있으므로 산소의 화학적 효과의 정량적 분석이 가능하게 된다. 그밖에도 산화제로 순수한 산소가 첨가될 경우에는 연료의 물분율이 감소함에 따라 급격히 확산화염에서 부분적 예혼합 화염으로 화염 특성이 변하게 되지만, 공기가 사용될 경우 연료의 물분율이 0.5 에서도 확산화염의 특성이 비교적 잘 유지될 수 있다.

Hwang et al.<sup>(11)</sup>은 매연생성의 초기 단계에서 C<sub>2</sub>와 C<sub>3</sub> 화학종 농도의 변화를 고려하여 에틸렌과 프로판의 매연생성 특성을 설명하였다. 특히 에틸렌에 프로판을 소량 혼합한 경우 매연발생이 증가하는 비 선형적인 변화는 연료에 따라 첨가되는 산소의 역할이 다를 수 있다는 것을 의미하고 있다. 따라서 본 연구에서는 순수 연료 이외에도 에틸렌과 다른 탄화수소(프로판, 에탄 및 메탄)가 혼합된 연료를 사용하여 확산화염 매연생성 과정에서 연료에 첨가되는 산화제의 역할을 알아보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

연료에 첨가되는 산화제가 확산화염의 매연생성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 동축류 확산화염과 광 소멸법(light extinction method)을 이용하여 적분된 매연체적분율(integrated soot volume fraction)을 측정하였다. 일반적으로 널리 사용되는 형태의 동축류 버너를 사용하여 축대칭 층류 확산화염을 형성하였다. 버너의 중심에 위치한 내경 8.0 mm의 황동 노즐을 통하여 연료가 공급되며, 공기 과잉(over ventilated) 층류 확산화염을 만들기 위하여 내경 76 mm의 동축관을 통하여 공기를 공급하였다. 공급되는 공기는 직경 2.5 mm의 유리구슬, 황동 스크린 및 하니콤 장치를 통과하여 층류를 형성하며 1000 scc/sec의 유량을 유지하도록 하였다. 사용된 동축류 버너의 구조 및 특성은 다른 논문<sup>(12)</sup>에서 자세히 설명되었다. 버너는 수직 이송장치에 장착되어 PC로 제어된다. 레이저 광원으로는 10 mW의 헬륨-네온 레이저(632.8nm)를 사용하였으며, 화염을 통과하며 변화하는 레이저 광의 세기는 광학 초퍼(optical chopper)와 록인(lock-in) 앰프 및 광 다이오드(Hamamatsu, S1337-1010BQ)를 사

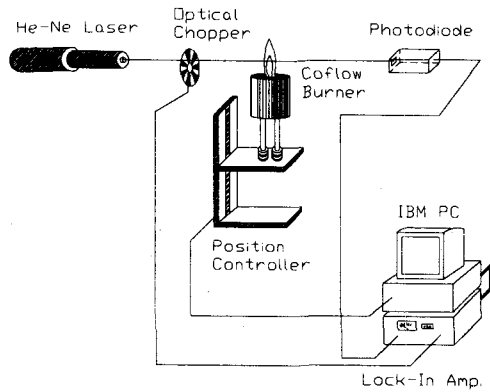


Fig. 1 Experimental set-up

용하여 측정하였다. Fig. 1 은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

연료로는 에틸렌(Matheson, 순도 99.5%), 프로판 (Air Products, 순도 99.5%), 에탄(Matheson, 순도 99.0%) 및 메탄(Alphagaz, 순도 99.9%)을 사용하였으며, 희석제와 산화제로는 각각 실린더 질소(순도 99.9%) 및 실린더 공기(순도 99.5%)를 사용하였다.

적분된 매연체적분율,  $F_v$  은 화염의 중심축을 통하여 측정하였다. 이때 화염 내부에서 생성되는 매연 입자의 크기는 레이저의 파장에 비하여 매우 작으므로 Beer의 법칙과 Rayleigh 극한을 가정하면

$$F_v = \int_{-\infty}^{\infty} \phi dr$$

$$= \frac{\lambda}{-Im\left\{\frac{(m^2-1)}{(m^2+2)}\right\}6\pi} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

관계로부터  $F_v$  값을 얻게된다. 여기에서  $\phi$  는 매연체적분율,  $m$  은 매연입자의 굴절률,  $I_0$  와  $I$  는 각각 화염 통과 전 후의 레이저 광의 세기를 나타내고,  $\lambda$  는 레이저광 파장인 632.8 nm 이며 매연 입자의 굴절률은  $m = 1.89 - 0.48i^{(13)}$ 를 사용하였다.

연료 유량은 탄소의 질량흐름율을 일정하게 유지시키도록 설정하였다. 에틸렌의 경우 3.0 scc/sec로 연료 유량을 일정하게 유지하면서 질소 또는 공기를 0 에서 7.0 scc/sec까지 7 단계로 변화하여 연료에 추가하였다. 이때 연료의 몰분율은 1.0 에서 0.3 까지 변화하게된다. 다른 연료를 사용한 경우에는 탄소 질량흐름율이 에틸렌 실험조건과 동일하도록 프로판의 유량은 2.0 scc/sec, 에틸렌/프로판, 에틸

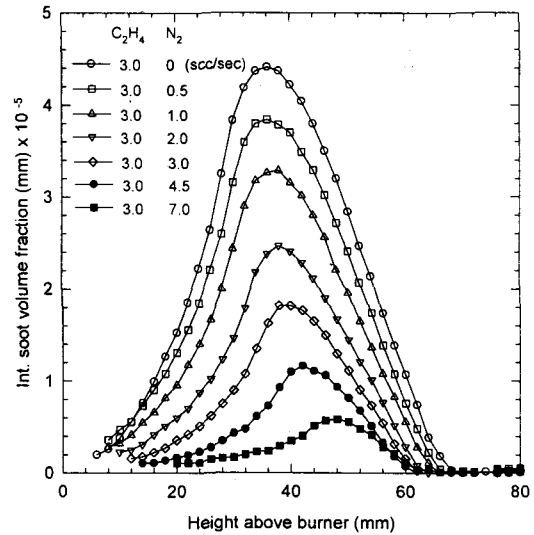


Fig. 2 Integrated soot volume fraction with N<sub>2</sub> addition for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> flames.

렌/에탄 및 에틸렌/메탄 혼합연료는 유량을 각각 2.57/0.29, 2.7/0.3 및 2.25/1.5 scc/sec로 설정하였다. 이때 각각의 혼합율은 Hwang et al<sup>(12)</sup>이 보여준 혼합연료의 매연발생 상승효과가 최대인 조건과 같게 되며, 연료에 첨가되는 질소 또는 공기 유량을 변화시키면서 적분된 매연체적분율을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 에틸렌 화염

에틸렌 화염의 연료라인에 질소와 공기를 첨가하며 적분된 매연체적분율,  $F_v$  을 측정하였다. Fig. 2 는 질소희석에 따른 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 확산화염 매연생성 특성의 변화를 보여준다. 에틸렌 유량을 3.0 scc/sec 으로 일정하게 유지하고 질소를 첨가하여 연료의 에틸렌 몰분율을 1.0 에서 0.3 까지 7 단계로 변화시켰다. 연료라인에 첨가되는 질소 유량이 증가되면 적분된 매연체적분율인  $F_v$  의 최대 값,  $F_{v,max}$  이 감소하며 또한 노즐 출구와  $F_{v,max}$  위치 사이, 즉 매연생성 지역의 기울기인  $dF_v/dz$  가 작아지는 것을 알 수 있다. 이때  $F_{v,max}$  위치는 질소 첨가량의 증가에 따라 화염의 상단으로 이동하였다. 이 현상은 매연생성을,  $w$  에 대한 초기 연료의 몰분율,  $X_{F,0}$  와 단열화염 온도,  $T_{ad}$  의 영향으로 다음과 같이 설명될 수 있다.<sup>(4)</sup>

Table 1. Adiabatic flame temperatures with  $N_2$  dilution (Initial temperature : 298.15 K).

$N_2$ (scc/sec)	$T_{ad}$ (K)	
	$C_2H_4$ (3.0scc/sec)	$C_3H_8$ (2.0scc/sec)
0	2369.8	2267.1
0.5	2359.0	2256.9
1.0	2348.3	2246.7
2.0	2326.8	2226.4
3.0	2305.5	2206.2
4.5	2273.5	2176.1
7.0	2220.7	2126.5

$$w \sim X_{F,O} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{ad}}\right) \quad (2)$$

여기에서  $E_a$  는 매연 생성 반응의 활성화 에너지,  $R$  은 기체상수를 나타낸다. 연료가 질소로 희석되면  $C_2H_4$  몰분율이 낮아지고 단열 화염온도가 감소하게 된다. 이에 따라 매연생성율이 낮아지며 화염에서의  $F_{v,max}$  와  $dF_v/dz$  값이 모두 줄어들게 된다. 매연생성에 대한 화염온도 변화의 영향은 단열 화염온도로 평가할 수 있다.<sup>(5)</sup> 질소 희석에 따른 확산 화염의 단열 화염온도 변화는 CEC code<sup>(14)</sup>를 이용하여 계산하였으며, Table 1 은  $C_2H_4$  및  $C_3H_8$  화염에 대한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 3 은 공기의 첨가에 따른 매연생성 특성의 변화를 보여주고 있으며, 이때의  $C_2H_4$  몰분율의 변화는 질소 첨가의 경우와 동일하도록 1.0 에서 0.3 까지 7 단계로 변화시켰다. 공기를 첨가할 경우  $F_{v,max}$  값은 같은 유량의 질소를 첨가한 경우보다 높게 나타났으며, 또한  $F_{v,max}$  위치가 화염의 하단으로 이동하였다. 공기 유량의 증가, 즉  $C_2H_4$  몰분율의 감소에 따라  $F_{v,max}$  값이 작아지고 있으나 매연 생성 단계에서의  $dF_v/dz$  값은 거의 같음을 보여주고 있어, 매연생성율  $w$  은 단지 초기 연료 몰분율  $X_{F,O}$  과 단열화염온도  $T_{ad}$  만으로 나타낼 수 없음을 알 수 있다. 따라서 연료에 첨가된 공기에 포함된 산소의 화학적 효과로 나타나는 매연 생성 반응을 고려하면 공기가 첨가된 경우 매연생성율은

$$w = w_D + w_{O_2} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $w_D$  는 희석 효과에

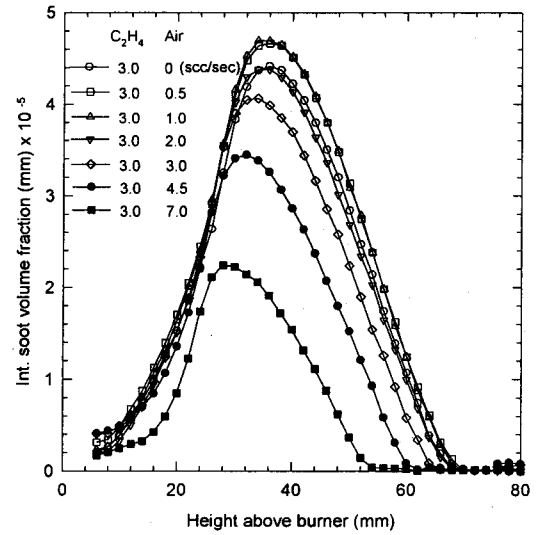


Fig. 3 Integrated soot volume fraction with air addition for  $C_2H_4$  flames.

의한 매연생성을,  $w_{O_2}$  는 산소의 화학적 효과에 의한 매연생성을 나타낸다. 이때  $w_{O_2}$  는  $w_D$  와는 달리 산소의 몰분율,  $X_{O_2}$  의 영향을 받게 되고

$$w_D \sim X_{F,O} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{ad}}\right) \quad (4)$$

$$w_{O_2} \sim X_{F,O} X_{O_2} \exp\left(-\frac{E_a'}{RT_{ad}}\right) \quad (5)$$

로 가정할 수 있게 된다. 매연생성율은 식 (2) 로부터

$$w \sim w_D \left[ 1 + A \exp\left\{-\frac{(E_a' - E_a)}{RT_{ad}}\right\} X_{O_2} \right] \quad (6)$$

와 같이 제안 될 수 있다. 이때 단열화염 온도가 일정할 경우  $F_{v,max}$  값은

$$F_{v,max} \sim X_{F,O} (1 + B X_{O_2}) \quad (7)$$

의 형태로 나타나게 되며, 여기에서 A 와 B 는 각각 일정한 상수를 의미한다. Fig. 4 는  $C_2H_4$  에 산화제를 첨가할 때의  $X_{O_2}$  에 따른  $F_{v,max} / X_{F,O}$  의 변화를 보여주고 있다. 확산화염 특성이 약해진 연료에 첨가된 산소의 몰분이 0.15 인 경우를 제외하고는 식 (7) 과 일치하는 선형적 관계가 관찰되었다.

Fig. 5 는  $C_2H_4$  몰분율에 따른  $F_{v,max}$  값의 변화를 보여주고 있다. 질소 희석 결과는 크기가 다른 동축류 버너를 사용한 결과<sup>(4)</sup>와 대체적으로 일치한

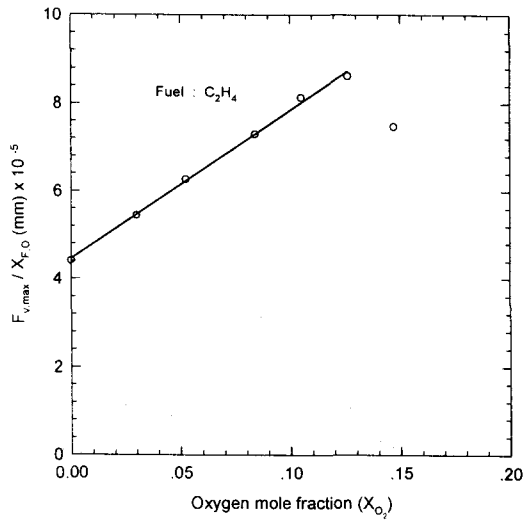


Fig. 4 Effect of oxygen and fuel mole fraction on a maximum integrated soot volume fraction.

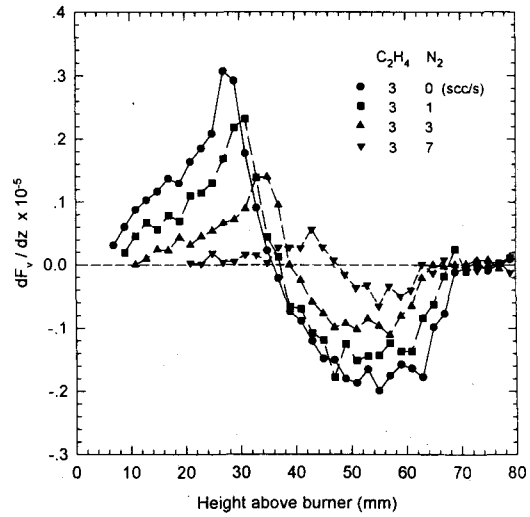


Fig. 6 Soot formation and oxidation rates with N<sub>2</sub> addition for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> flames.

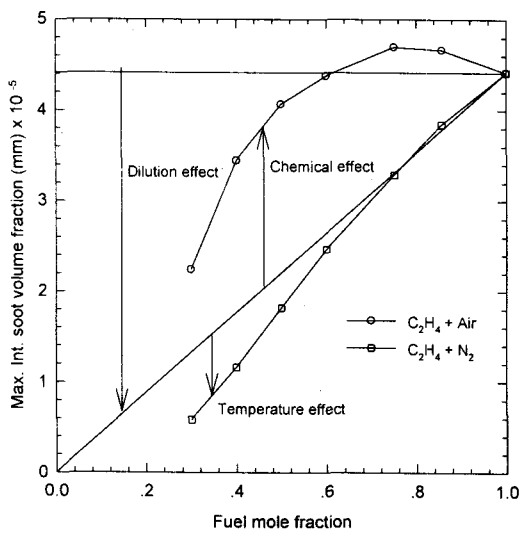


Fig. 5 Influence of N<sub>2</sub> and air addition on a maximum integrated soot volume fraction for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> flames.

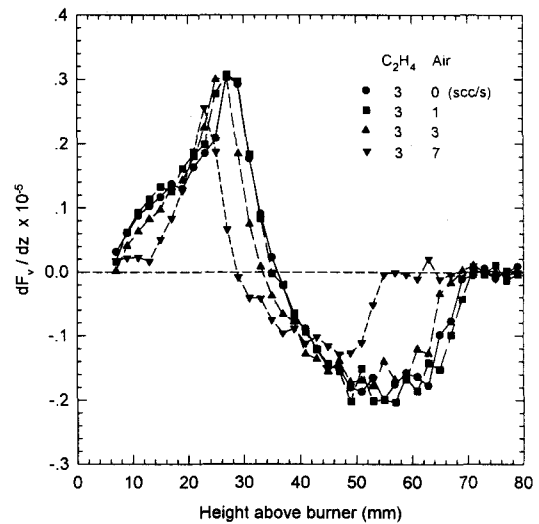


Fig. 7 Soot formation and oxidation rates with air addition for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> flames.

다. 이때 Table 1 에서와 같이 질소 희석에 따른 단열화염온도의 변화가 있어 희석 효과와 단열화염 온도 감소 효과가 함께 나타나게 된다. 그러나 Fig. 5 에서 볼 수 있는 것처럼, 실험된 온도 영역에서의  $F_{v,max}$  값의 감소는 대부분 희석 효과라고 할 수 있다. 공기를 첨가한 경우에는 단열화염온도가 일정하므로  $F_{v,max}$  값의 변화는 단지 희석 효과와 산화제의 화학적 효과의 결과라고 할 수 있으며 질소 희석 결과와 비교하여 산화제의 영향이 매우 큰 것

을 알 수 있다.

확산화염의 연료를 질소로 희석하면 연료 농도의 감소에 따라 매연 생성반응 속도가 느려지게 된다.<sup>(4,6)</sup> 그러나 에틸렌 화염의 연료에 공기를 첨가하면 질소로 희석된 경우와는 다르게 연료의 농도가 감소하여도 매연의 생성율과 산화율이 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 에틸렌/질소 및 에틸렌/공기 화염에서의 화염 높이에 따른  $F_v$  의 변화인  $dF_v/dz$  값을 보여주고 있다.

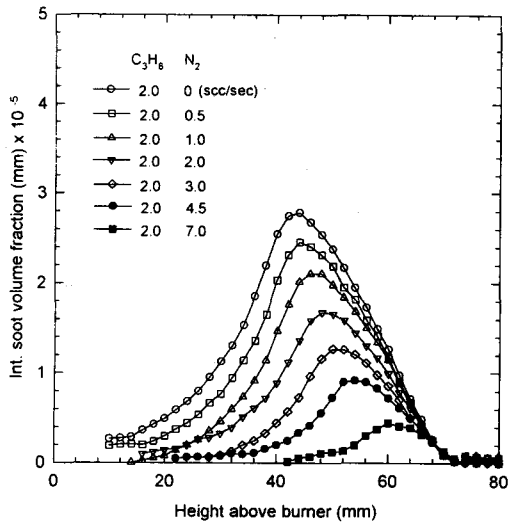


Fig. 8 Integrated soot volume fraction with  $N_2$  addition for  $C_3H_8$  flames.

Fig. 6 에서 에틸렌의 연료를 질소로 희석하면 질소의 증가에 따라 매연생성율( $dF_w/dz > 0$  지역)과 매연산화율( $dF_w/dz < 0$  지역)이 크게 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이는 연료 농도의 감소에 따라 반응율이 낮아지기 때문이라고 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 반면에 연료에 공기가 첨가되는 Fig. 7 에서는 매연생성율( $dF_w/dz > 0$  지역)과 매연산화율( $dF_w/dz < 0$  지역)이 모두 첨가되는 공기에 의해 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있으며, 특히 이는 매연생성율이 식 (3) 에서와 같이 산소에 의한 매연생성율의 증가인  $w_{O_2}$  의 영향을 받기 때문이라고 생각된다.

### 3.2 프로판 화염

에틸렌 확산화염과 같은 방법으로 프로판에 대한 희석제와 산화제의 영향을 살펴보았다. 질소 희석에 따른  $C_3H_8$  확산화염의 매연 생성 특성의 변화는 Fig. 8 에, 공기 첨가에 따른 특성 변화는 Fig. 9 에 각각 나타내었다. 동축류 화염의 매연발생 특성은 탄소원자의 질량흐름율에 의해서 결정되므로 에틸렌 화염의 탄소원자 질량흐름율과 동일하도록  $C_3H_8$ 의 유량을 2.0 scc/sec 로 설정하고 첨가하는 질소 또는 공기는 0 에서 7.0 scc/sec 의 7 단계로 변화시켰다. 질소로 희석한 경우의  $F_{v,max}$  위치는 질소 유량의 증가에 따라 화염의 상단으로 이동하

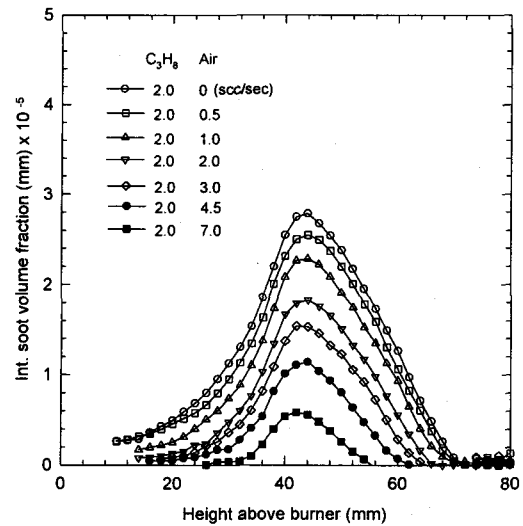


Fig. 9 Integrated soot volume fraction with air addition for  $C_3H_8$  flames.

였으나 공기를 첨가하면  $F_{v,max}$  위치는 첨가되는 공기의 유량과 관계없이 거의 일정하였다. 이와 같은 현상은 질소로 희석할 경우 Table 1 에서 보여주는 것과 같이 단일 화염 온도가 낮아지게 되어 매연생성 반응의 시작점이 화염의 상단으로 이동하지만, 공기를 첨가할 경우에는 단일화염온도의 변화가 거의 없기 때문이라고 생각된다.

Fig. 10 은  $C_3H_8$  분율에 따른  $F_{v,max}$  값의 변화를 보여주고 있다. 동축류 화염의 매연발생 특성은 탄소원자의 질량흐름율에 의해서 결정되므로 에틸렌의 결과와 비교하기 위하여  $C_2$  에 상응하는 분율로 변환하여 나타내었다. 프로판 화염의 경우 질소와 공기의 첨가에 따른 매연생성량의 차이는 크지 않으며 대부분 화염온도의 변화 효과라고 생각된다. 최근의 연구 결과<sup>(10)</sup>는 에틸렌에 산소가 첨가되면 열해리 지역에서 O 라디칼의 역할로  $C_3H_3$ 의 생성이 증가하여 매연생성 초기 단계의 벤젠고리와 PAH 농도를 증가시키고 궁극적으로 매연생성량을 증가시킬 수 있음을 보여주었다. 그러나 프로판 화염은 매연생성 과정이 O 라디칼에 의한  $C_3H_3$ 의 생성에 크게 민감하지 않다고 알려지고 있어, 첨가되는 산소의 화학적 효과가 크지 않으며 매연생성 특성은 화염의 온도 변화에 더 영향을 받는다고 할 수 있다. 이때 Table 1 에 나타난 바와 같이  $C_3H_8$ /공기의 단일화염온도(2267.1 K)는  $C_2H_4$ /공기의 단일화염온도(2369.8 K)보다 낮으므로 첨가

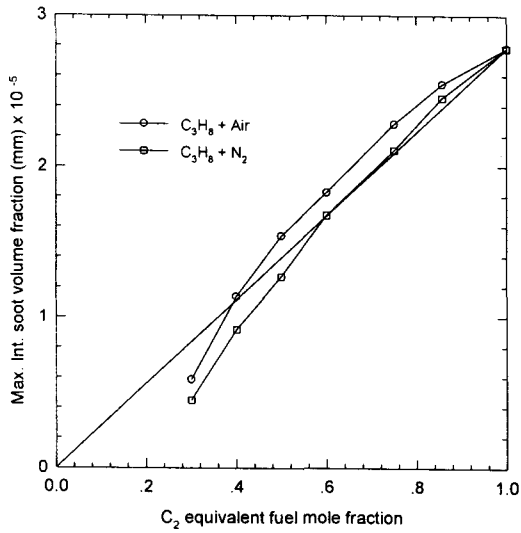


Fig. 10 Influence of N<sub>2</sub> and air addition on a maximum integrated soot volume fraction for C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> flames.

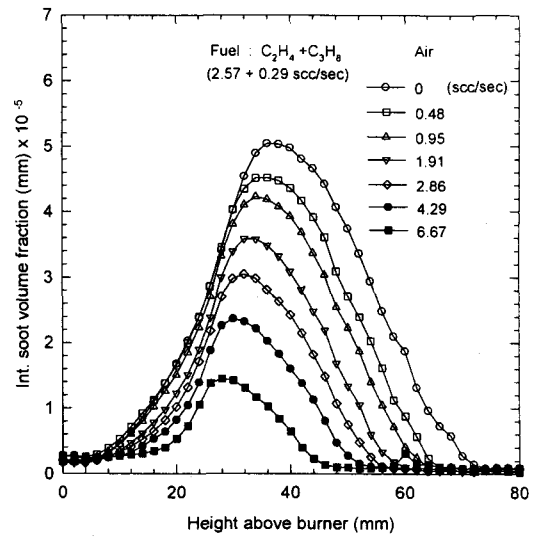


Fig. 12 Integrated soot volume fraction with air addition for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> mixture flames

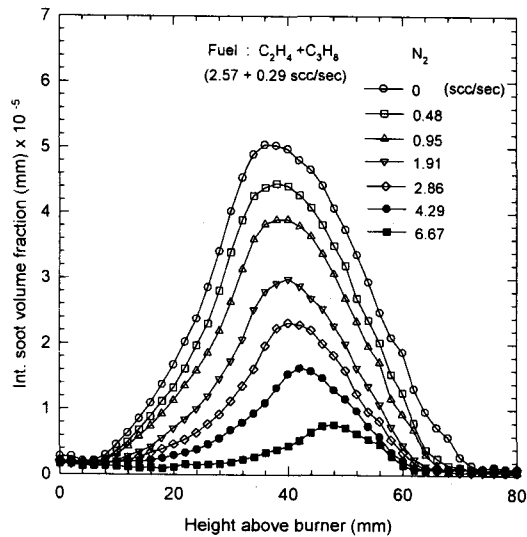


Fig. 11 Integrated soot volume fraction with N<sub>2</sub> addition for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> mixture flames

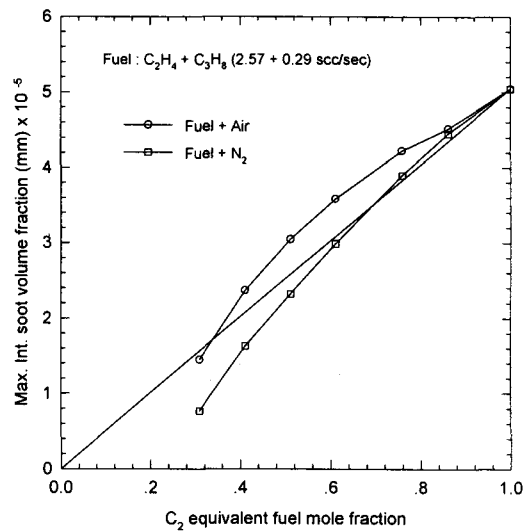


Fig. 13 Influence of N<sub>2</sub> and air addition on a maximum integrated soot volume fraction for C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> mixture flames

되는 산소의 매연생성 증가 효과가 상대적으로 작다고 생각된다. 이러한 해석은 2400 K의 단일화염 온도에서는 프로판에 첨가한 산소가 매연생성율을 증가시킨 반면,<sup>(7)</sup> 2270 K의 단일화염온도에서의 실험에서는 산소의 화학적 영향이 거의 없다는 것<sup>(3,9)</sup> 과도 일치한다.

### 3.3 혼합연료 화염

에틸렌에 소량의 프로판을 혼합하면 매연생성

이 에틸렌 확산화염보다 더 활발하게 되며, 이 현상은 매연생성 초기 단계에서의 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 및 C<sub>3</sub>H<sub>3</sub> 와 같은 C<sub>2</sub> 및 C<sub>3</sub> 화학종들의 역할로 설명되고 있다.<sup>(10,11)</sup> 따라서 에틸렌에 프로판, 에탄 또는 메탄을 연료의 혼합 효과가 가장 크게 나타나는 조건으로 혼합하여 연료에 첨가되는 산화제의 효과를 평가하였다. 이때 탄소 질량흐름율은 에틸렌 실험조건과 동일하도록 에틸렌/프로판, 에틸렌/에탄 및 에틸렌/메탄 혼합연료의

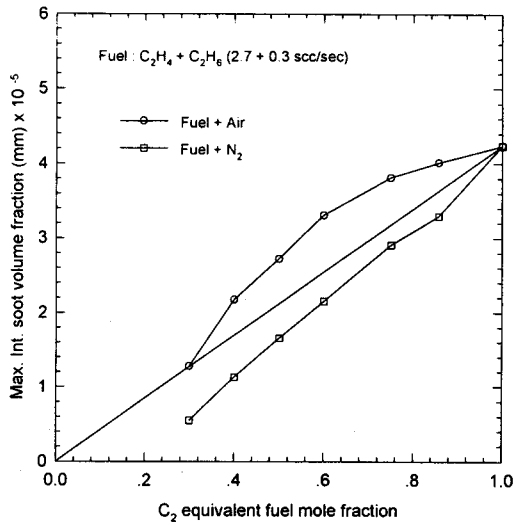


Fig. 14 Influence of  $N_2$  and air addition on a maximum integrated soot volume fraction for  $C_2H_4/C_2H_6$  mixture flames

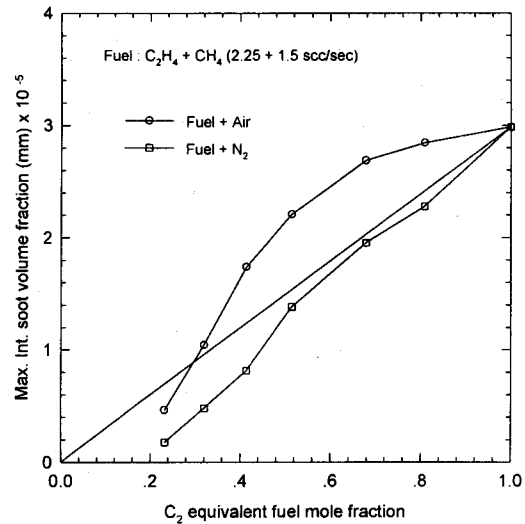


Fig. 15 Influence of  $N_2$  and air addition on a maximum integrated soot volume fraction for  $C_2H_4/CH_4$  mixture flames

유량을 각각 2.57/0.29, 2.7/0.3 및 2.25/1.5 scc/sec 로 설정하였다.

Fig. 11 과 Fig. 12 는 각각 에틸렌/프로판 혼합 연료에 대한 질소와 공기 첨가 결과를 보여주고 있으며, Fig. 13 은  $C_2$  에 상응하는 물분율로 변환된 연료의 물분율에 따른  $F_{v,max}$  값의 변화를 보여주고 있다. 이 결과에서 대부분의 연료가 에틸렌이지만 매연발생 특성은 프로판 화염과 매우 유사함을 알 수 있다. 에틸렌 실험 결과와 비교하면 공기를 첨가한 경우의  $F_{v,max}$  값은 질소를 첨가한 경우와 약간의 차이만을 보여주었으며,  $F_{v,max}$  위치는 첨가되는 공기와 질소의 유량의 증가에 따라 각각 화염의 하단과 상단으로 이동하였다.

Fig. 14 와 Fig. 15 는 각각 에틸렌/에탄과 에틸렌/메탄 혼합연료에 질소와 공기를 첨가한 결과를  $C_2$  에 상응하는 물분율로 변환된 연료의 물분율에 따른  $F_{v,max}$  값의 변화로 보여주고 있다. 에틸렌/프로판 혼합연료의 결과와는 다르게 첨가되는 공기는 매연생성을 크게 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 순수한 확산화염의 실험에서는 에틸렌에 에탄 또는 메탄을 혼합한 경우 매연생성의 상승효과가 매우 적거나 전혀 나타나지 않았다<sup>(11)</sup> 따라서  $C_2$  계열간의 연료 또는  $C_2$  와  $C_1$  계열의 연료를 혼합한 경우 화염에서의  $C_3H_3$  화학종의 증가가 크지 않으므로, 연료에 첨가되는 공기는  $C_3H_3$  화학종을 증

가시켜 매연생성 증가의 효과를 나타낸다고 생각된다.

#### 4. 결론

확산화염의 매연생성에 미치는 산화제의 영향을 실험적으로 알아보았다. 산화제로 공기를 사용하였으며, 단일화염온도를 일정하게 유지하면서 매연생성에 대한 산화제의 영향을 정량화 할 수 있었다. 에틸렌 화염의 연료에 공기를 첨가하면 같은 유량의 질소를 첨가하는 경우보다 매연생성이 크게 증가하였다. 그러나 프로판 화염의 연료에 공기를 첨가하면 매연생성 특성의 변화는 질소를 첨가하는 경우와 크게 다르지 않았다. 에틸렌/프로판 혼합 화염의 연료에 대한 공기의 첨가는 질소의 첨가와 큰 차이가 없었으며 프로판 화염의 매연생성 특성과 비슷하였다. 반면에 에틸렌/에탄 및 에틸렌/메탄 혼합 화염은 연료에 첨가되는 공기는 질소의 첨가에 비하여 매연생성을 크게 증가시켰으며 에틸렌 화염의 매연생성 특성과 유사함을 보여주었다. 이와 같은 연료구조에 따른 연료에 첨가되는 산화제 효과의 차이는 매연생성 초기 단계의  $C_2$  와  $C_3$  화학종 농도 변화로 해석되었다. 에틸렌, 에틸렌/에탄 및 에틸렌/메탄 화염의 연료에 첨가되는 공기는  $C_3H_3$  화학종의 농도를 증가시키고 궁극적으로 매연생성



을 증가시킨다고 생각된다.

에틸렌 연료에 첨가된 산화제의 화학적 효과는, 회석에 의한 매연생성을 변화와 산소에 의한 매연생성을 변화를 모두 고려한 수정된 매연생성을 모델로 설명할 수 있었다. 확산화염에 회석제 및 산화제를 첨가 할 경우, 연료 회석 효과, 화염 온도 변화 효과, 및 산화제의 화학적 효과가 복합적으로 나타나며, 상대적인 중요도는 연료의 구조 및 단일 화염온도의 범위에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다.

### 후기

이 논문은 1996년도 단국대학교 대학연구비의 지원에 의해 수행된 연구의 일부입니다.

### 참고문헌

- Saito, K., Williams, F. A. and Gordon, A. S., "A Study of the Two-Color Soot Zone for Small Hydrocarbon Diffusion Flames," 1987, Combustion Science and Technology, 51, 258-305.
- Hura, H. S. and Glassman, I., 1987, "Fuel Oxygen Effects on Soot Formation in Counterflow Diffusion Flames," Combustion Science and Technology, 53, 1-21.
- Hura, H.S. and Glassman, I., 1988, "Soot Formation in Diffusion Flames of Fuel/Oxygen Mixtures," Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 371-378.
- 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.
- Gülde, O. L., 1992, "Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elevated Temperatures," Combustion and Flame, 88, 74-82.
- Gülde, 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.
- Gülde, O. L., 1995, "Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane, Propane, and n-Butane Diffusion Flames," Combustion and Flame, 101, 302-310.
- Du, D. X. et al, 1995, "Soot Formation in Strained Diffusion Flames with Gaseous Additives," Combustion and Flame, 102, 11-20.
- Du, D. X., Axelbaum, R. L. and Law, C. K., 1990, "The Influence of Carbon Dioxide and Oxygen as Additives on Soot Formation in Diffusion Flames," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1501-1507.
- Hwang, J. Y., Chung, S. H. and Lee, W., 1998, "Effects of Oxygen and Propane Addition on Soot Formation in Counterflow Ethylene Flames and the Role of C<sub>3</sub> Chemistry," Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh.(to be presented)
- Hwang, J. Y., Lee, W., Kang, H. G. and Chung, S. H., 1998, "Synergistic Effect of Ethylene-Propane Mixture on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames, Combustion and Flame, 114, 370-380.
- 이원남, 1998, "층류 확산화염에서의 PAH 및 매연생성에 대한 압력의 영향", 대한기계학회논문집B (submitted).
- Lee, S. C. and Tien, C. L., 1980, "Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames," Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1159-1166.
- Gordon, S. and McBride, B. J., 1971 and 1984. NASA SP-273 and TM-86885.