

층류확산화염에서 질소 첨가와 예열온도가 매연 생성에 미치는 영향

정용기*·이종호*·전충환*·장영준**
(2003년 1월 29일 접수, 2003년 12월 10일 심사완료)

The Effects of N₂ Diluent and Preheated Air on Soot Emission in Laminar Diffusion Flames

Yong Ki Jeong, Jong Ho Lee, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

Key Words: Soot Formation(매연생성) Air-Side Dilution(공기측 희석), Fuel-Side Dilution(연료측 희석), Dilution Fraction(희석 분율), PLII(평면 레이저유도 형광), Chemkin(화학반응 코드)

Abstract

An study has been performed with axisymmetric coflow diffusion flames to investigate the influence of air-side, fuel side dilution and initial preheated temperature on the soot formation in methane/air flames. Soot quantities are determined by using PLII(Planar Laser Induced Incandescence), such a C₂H₂ major species(CH₄, O₂, N₂) and temperature are simulated by chemkin code. The numerical analysis was performed with transport properties and detailed reaction mechanisms in axisymmetric coflow diffusion flames. The study of how flame temperature and N₂ dilution of air and fuel side influence the soot concentrations is focused. Soot concentrations results on PLII show that preheated temperature contributes to an increase in the soot volume fraction, and soot formation is more productive to air side dilution than to fuel side dilution. C₂H₂ concentrations have a similar tendency to soot concentrations.

1. 서론

다양한 연소과정으로부터 생성되는 배출가스는 광화학 스모그와 산성비 등의 환경문제를 유발시키며, 또한 점점 엄격해지는 배기규제를 만족시키기 위해 배기 배출물 제어에 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 같이 배기가스에 관한 연구가 오랜기간 동안 이루어져왔지만 실용연소에서의 배기배출물 (NOx와 soot) 생성기구⁽¹⁻³⁾에 관한 연

구와 이해는 지금도 계속되고 있는 실정이다.

Soot 발생 특성 연구에 있어 Glassman⁽⁴⁾ 등은 예혼합화염과 확산화염에서 화염온도가 soot 생성에 미치는 영향을 연구하였으며, 예혼합화염의 경우 화염온도의 상승은 soot의 발생을 감소시키고, 반대로 확산화염의 경우 soot를 증가시킨다고 보고하였다.

Wey⁽⁵⁾ 등은 층류프로판확산화염에서 온도가 soot 생성에 미치는 영향을 연구하였다. 이 연구에서는 화염온도를 가변하기 위해 산화제측에 질소를 첨가하여 화염온도를 일정하게 유지하였으며, 높은 화염 온도에서는 응집입자의 수밀도보다는 soot응집입자의 크기가 soot 생성에 더 큰 영향을 미친다고 보고하였다.

Kermit⁽⁶⁾ 등은 프로판과 에틸렌 연료를 사용하여 희석제로서 반응화학종 (CO, H₂), 높은 확산계

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
E-mail : chjeon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3051 FAX : (051)512-5236

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

수를 가진 화학종 (H_2 , He), 그리고 비반응 화학종 (Ar , N_2)을 첨가하여 soot생성에 관한 연구를 하였고, 또 메탄, 프로판, 그리고 에틸렌 확산화염에서 flickering 화염상태가 동일한 연료-공기비에서 정상 상태보다 soot 생성이 많이 발생한다는 것을 확인하였다.

위에서 상술한 것과 같이 희석제를 첨가하였을 때 여러 가지 조건에 따른 다양한 영향을 분리하는 것은 어렵다. 본 논문에서는 이를 위해 Axelbaum^(7,8)이 채택한 아래와 같은 2가지 범주로 나누어 soot 발생 특성을 연구하였다. 첫번째 활성화학종의 농도 감소에 의한 희석효과(Dilution effect)와 두번째 희석제의 첨가에 의한 화염온도의 변화에 따른 열적효과(Thermal effect)를 구분하기 위해 단일화염 온도 개념을 사용하였다.

Gülster⁽⁹⁾ 등도 단일화염 온도(T_{ad})를 2400K로 고정시킨 후, 여러 종류의 연료에 대하여 산소농도가 soot 생성에 미치는 화학효과(Chemical effect)를 관찰하였다.

또한, Feese⁽¹⁰⁾ 등은 동축 확산화염에서 연료, 공기의 온도를 각각 413K, 398K로 고정하였을 때, 질소첨가에 따른 NOx 배출 특성을 관찰하였다.

특히, soot 발생 특성을 연구하는데 있어 희석제를 첨가하는 위치와 초기 공급 온도 변화를 동시에 고려한 soot 발생 특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 희석효과와 열적효과를 분리하기 위하여 단일화염온도^(7,8) 개념을 사용하여 배기배출물 특성을 파악하고자 한다.

선행연구결과에 대한 원인을 규명함에 있어, 난류 유동에 의한 영향을 배제한 화학적 변화(열적효과와 희석효과)에 대한 영향만을 살펴보기 위하여 층류 확산화염을 연구 대상으로 하였으며, soot 생성 특성을 연구함에 있어 희석분율⁽¹⁰⁾ (Dilution fraction, Z) 파라미터를 도입하여 희석분율(Z)과 단일화염(T_{ad})의 변화에 따른 soot 발생 특성을 조사하였다. 특히 T_{ad} 가 일정한 조건에서 Z의 변화에 따른 soot 생성 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 동축류 버너

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 연소기로서 직경

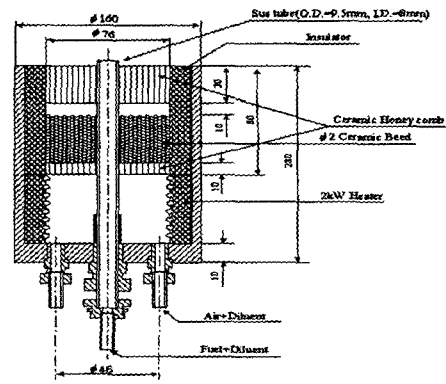


Fig. 1 Schematic diagram of co-flow burner

8mm인 연료노즐과 유동의 층류화를 위해 직경 76mm의 세라믹 허니컴이 설치된 공기 노즐로 구성되어 있다. 공급되는 연료와 공기의 열적효과를 변화시키기 위해 연소기 내부에 발열용량 2kW 전열기를 버너와 일체형으로 설치하였고, 공급 온도를 일정하게 유지하기 위해서 히터 내부와 버너 출구단에 K타입의 열전대를 설치하여 온도를 일정하게 유지하였다. 공급되는 공기, 연료 및 희석제는 일정한 온도를 유지한 상태로 설정유량을 공급할 수 있도록 정확성이 $\pm 1\%$ 인 MFC (Mass Flow Controller)를 이용하여 공급하였다.

2.2 Soot 측정을 위한 PLII 실험장치

평면 레이저 유도 백열법(PLII)을 이용하여 희석위치(연료측과 산화제측)와 희석분율(Z)에 따른 soot 발생특성을 계측하였다. Soot 측정을 하기 위한 레이저 유도 백열법 실험 장치도를 Fig. 2에 나타내었다. 화염 내 soot 분포의 2차원 측정은 Ni⁽¹⁴⁾ 등의 연구를 참조하였으며 실험장치도는 크게 세부분으로 구성되어 있다. 신호발생을 위한 Nd : YAG 레이저(Quentel, YAG 980)의 광원부와 2차원 영상을 획득하기 위한 A/D 변환기, UV렌즈(Nikon, 105mm, F4.5)와 Narrow band pass filter를 장착한 ICCD(PI, IMAX-512), 그리고 취득된 이미지를 처리하는 데이터 취득부로 구성되어 있다.

Soot 측정을 위해 레이저는 Nd : YAG 레이저의 2차 고조파인 532nm를 펄스 당 15mJ로 하여 광원을 생성하였다. 2차원 PLII 이미지를 획득하기 위해 평면광을 화염의 중심부에 조사하여 2DPLII 신호를 획득하였다. ICCD카메라는 다른 신호의 간섭을 피하기 위해

중심 파장이 400nm 필터(FWHM=10nm)를 장착하였다.

2.3 수치적 접근

PLII 실험과 동일한 열적효과와 회석효과를 고려한 조건에서 수치해석을 통해 화염구조를 파악하고, soot의 전구물질인 C₂H₂의 분포를 확인하였다.

계산은 경계층 근사를 적용한 포물선형의 방정식을 사용하였으며 노즐 출구의 초기조건과 외측의 벽면 조건을 변수로 사용하여 계산을 행하였다. 그리고 계산에 필요한 반경방향 격자수는 부등간격으로 300개를 배열하였으며 축방향으로 점진적으로 계산을 행하는 방법을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 운동량 방정식 (1)과 화학종 방정식 (2) 그리고 에너지보존 방정식 (3)은 아래와 같다.⁽¹¹⁾ 여기서 복사 열전달과 soot 효과는 무시하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \varphi} (r^2 \rho u \cdot \mu \frac{\partial u}{\partial \varphi}) + \frac{1}{\rho u} (-\rho g - \frac{dp}{dx}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial m_k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \varphi} (r^2 \rho u \cdot D_{k0} \frac{\partial m_k}{\partial \varphi}) + \frac{R_k}{\rho u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \varphi} (r^2 \rho u \cdot \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial \varphi} [r^2 \rho u (\mu - \frac{\lambda}{C_p}) \frac{\partial (u^2/2)}{\partial \varphi}] + \frac{\partial}{\partial \varphi} \sum_k r^2 \rho u (D_{k0} - \frac{\lambda}{C_p}) h_k \frac{\partial m_k}{\partial \varphi} \quad (3)$$

화학반응식과 열역학적 물성치의 계산은 CHEMKIN-II를 이용하였고, 전달 물성치는 TRANSPORT package로 계산 하였다. 본 연구에서 사용된 화학반응 메카니즘은 49개의 화학종과 279개의 화학반응식으로 이루어진 GRI-Mech 2.11을 이용하였다.

2.4 실험조건

실험적으로 회석효과와 열적효과를 독립적으로 분리하고, 회석위치(연료측과 산화제측)에 따른 영향을 고려하기 위해 회석분율(Dilution fraction, Z) 파라미터를 도입하였다.

회석분율(Z)은 아래와 같이 정의⁽¹⁰⁾된다.

$$Z = f_s \frac{Y_{dil,F}}{1 - Y_{dil,F}} + (1 - f_s) \frac{Y_{dil,A}}{1 - Y_{dil,A}} \quad (4)$$

단, Y_{dil,F}, Y_{dil,A}는 연료측과 산화제측 각각에서의 회석제의 질량분율, f_s는 이론 혼합기에 대한 연료의 질량분율을 나타낸다. 산화제측 회석을 실현하기 위해서는 Y_{dil,F}을 영(zero)으로 놓고 Y_{dil,A}을 변화시키며, 연료측 회석은 Y_{dil,A}을 영으로 고정하고 Y_{dil,F}를 바꾸어가며 일정한 범위의 Z값을 결정하였다.

공급된 연료 및 공기는 0.2 lpm의 메탄과 화염의 안정화 역할 및 산화제로서 50 lpm의 공기를

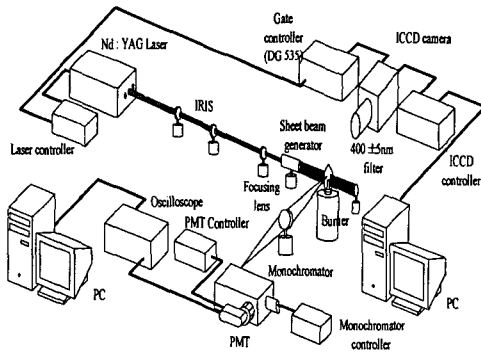


Fig. 2 Schematic of experimental setup

Table 1 Computational conditions

CASE	Q _{Fuel}	Q _{Air}	T _{inlet}	Z	Z _{st}	T _{ad}	Diluent	
I	0.2 (lpm)	50 (lpm)	300K	0	0.055	2226K		
			600K			2368K		
			900K			2499K		
II			300K	0	0.055	2226K		Fuel-side
				0.163	0.190	2226K		
				0.412	0.334	2226K		
III			300K	0	0.055	2226K		Air-side
				0.163	0.043	2226K		
				0.412	0.035	2226K		

공급하였다. 연료 및 공기의 초기온도는 300-900K의 범위에서 실험을 행하였으며, 이때의 단열화염온도는 2226~2499K이다. 선행연구로서 가연 한계 실험을 행하였으며, 그 결과를 T_{ad} 와 Z 의 함수로 Fig. 3에 나타내었다. 이를 근거로 안정연소영역 내에서 실험조건을 선정하였다. 본 실험에서는 여러 가지 파라미터 중, 단열화염온도의 개념을 사용하여 회석을 하지 않고($Z=0$), 초기 공급온도만을 상승시킨 경우, 즉 단열화염온도를 상승시킨 경우와 단열화염온도를 일정하게 하기 위해 연료측과 산화제측에 회석제를 첨가시킨 경우에 관하여 실험을 행하였다. 이를 정리하면 Table 1과 같다. Case I은 soot 생성에 미치는 T_{ad} 의 영향, 즉 초기 공급온도의 영향을 알아보기 위한 조건이고, case II와 III는 연료측과 산화제측에 각각 회석제를 첨가시킨 경우로 일정한 단열화염온도($T_{ad}=2226K$)를 유지하기 위해 Z 를 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

본 실험에 도입한 회석분율(Z)과 이론혼합비(Z_{st})를 비교하여 Table 1에 첨가하였다. Axelbaum⁽¹²⁾ 등은 이론혼합비(Z_{st})의 감소는 soot의 발생이 증가하고, 반대로 이론혼합비의 증가는 soot을 감소시킨다고 보고하고 있다. 이론혼합비(Z_{st})는 아래와 같이 정의된다.

$$Z_{st} = \left(1 + \frac{Y_{F,1}W_{O}v_{O}}{Y_{O,1}W_{F}v_{F}}\right)^{-1} \quad (5)$$

단, $Y_{F,1}$, $Y_{O,1}$ 는 연료측과 산화제측 각각에서의 연료와 산소의 질량분율을 나타낸다. W 는 분자량, v 는 이론 상수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PLII 기법을 이용한 soot 발생 특성

Soot 발생특성을 파악하기 위해 2차원 LII 기법을 이용하여 soot의 신호강도를 Fig. 4에 나타내었다. 실험조건에 따른 신호강도를 고려하여 각각의 스케일을 사용하였다.

Fig. 4(a)는 soot 생성에 미치는 열적 특성을 파악하기 위해 회석을 하지 않고 단열화염온도를 2226K에서 2499K로 증가시킨 경우로 soot 분포영역의 증가와 동시에 soot 발생 강도가 크게 나타났다.

Fig. 4(b)와 (c)는 회석을 하는 위치와 회석분율에 따른 soot 발생특성을 나타낸 것이다. Fig.

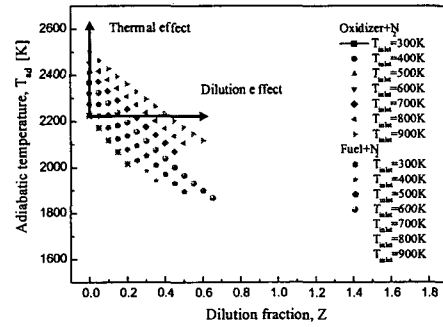
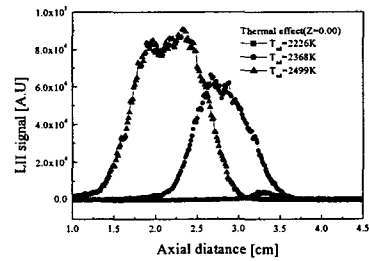
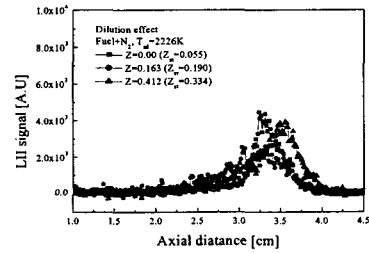


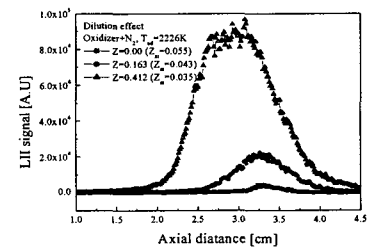
Fig. 3 Flammability limits



(a) Case I (No dilution)



(b) Case II (Fuel-side dilution)



(c) Case III (Air-side dilution)

Fig. 4 Soot PLII image at experimental conditions

4(b)는 단열화염온도를 2226K로 일정하게 유지하고 연료측에 질소를 첨가한 경우로 희석분율(Z)의 상승에 따른 soot 발생강도는 약간 감소하였다. Fig. 4(c)는 산화제 측에 질소를 첨가시킨 경우로 Z 가 0.412로 증가시킬수록 soot 신호강도가 증가한다. 즉 연료측에 희석제를 증가시킨 경우는 soot 신호강도가 감소하고, 반대로 산화제측에 희석제를 증가시킨 경우에는 soot 신호강도가 증가하였다.

희석분율(Z)과 이론혼합비(Z_{st})를 비교를 위하여 Fig. 4에 함께 나타내었다. 연료측 희석의 경우 실험조건에서 계산한 Z_{st} 는 연료측에 희석을 증가시킬 경우 Z_{st} 는 0.055에서 0.334로 상승하였다. 즉 Z_{st} 의 증가에 따라 soot의 최고치는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 Axelbaum⁽¹²⁾ 등의 결과와 동일한 경향으로 Z_{st} 의 증가는 soot의 전구물질(C_2H_2)이 억제되어 발생하는 결과로 사료된다.

산화제측 희석에 경우 희석을 증가시킬수록 연료측과는 반대로 Z_{st} 가 0.055에서 0.035로 감소하였다. Axelbaum의 결과에서 Z_{st} 의 감소는 soot 발생확률이 높은 것으로 보고 되고 있으며 본 논문의 Case III의 결과에도 soot가 많이 발생하였다.

Fig. 5는 soot가 발생하기 시작하는 높이(Inception limit)를 각 조건마다 나타낸 것이다. 단열화염온도만을 증가시킨 경우(■)에는 단열화염이 2226K에서 2499K로 증가할수록 soot가 초기에 발생하였고, soot가 최고치가 되는 지점도 앞당겨졌다. 일정한 단열화염온도 조건에서 연료측 희석의 경우(●) soot 발생 시점이 다른 조건에 비해 높게 나타나며, 희석분율의 증가에 덜 민감하였다. 반면에 산화제측 희석의 경우(▲) 희석분율이 증가할수록 soot 발생이 노즐 팁에 근접하여 발생하였다.

3.2 화염구조

본 실험의 Soot 측정의 결과를 보다 자세히 분석하기 위해 Chemkin 코드를 사용하여 화염구조를 파악하였다.

Fig. 6은 case I, II, III의 대표적인 경우로 단열화염온도가 2226K인 일정한 조건하에서 희석을 하지 않은 상태와 연료측과 산화제측에 N_2 를 희석시켜 $Z=0.163$ 인 경우에 대해 축방향으로의 CH_4 , N_2 , O_2 , OH 그리고 온도 분포를 수치적으로 계산하여 나타낸 것이다.

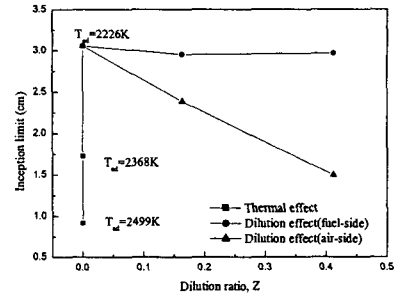
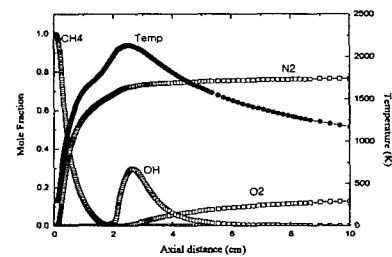
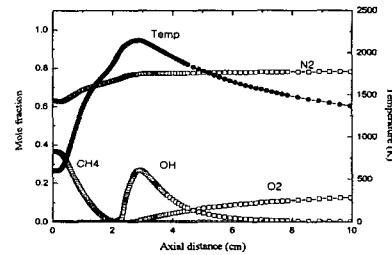


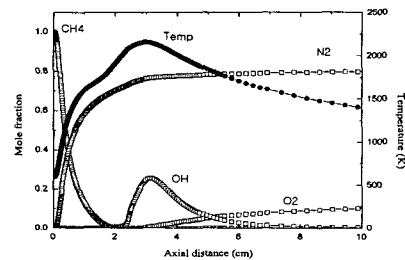
Fig. 5 Inception limit at experimental conditions



(a) $T_{ad} = 2226K$



(b) $T_{ad} = 2226K, Z=0.163$ (Fuel-side)



(c) $T_{ad} = 2226K, Z=0.163$ (Air-side)

Fig. 6 Flame structure for no dilution, fuel and air-side dilution

부의 N_2 와 O_2 가 반응하여 최고온도 지점을 지나 공기가 과잉인 지점에 OH가 발생하는 것을 보여 주고 있다. Fig. 6(b)는 연료측에 질소를 첨가한 것으로 기준상태($T_{ad}=2226K$)와 비교해 연료(CH_4) 물분율이 1에서 0.368로 감소되고, 희석제인 N_2 의 물분율은 0에서 0.632로 증가되며, Fig. 6(a)의 결과와 많은 차이를 보여준다. Fig. 6(c)는 산화제측에 희석을 시킨 경우로 Fig. 6(a)와 동일한 경향을 나타낸다. 이는 산화제측 희석의 경우, 질소가 공기의 주 구성요소이므로 질소첨가는 산화제측의 화학변화에 있어 미약한 영향을 미친다. 즉, 산소농도가 21%에서 14.4%, 질소농도는 79%에서 85.6%로 연료측 희석에 비해 상대적으로 작은 변화가 발생한다. 확장 Zeldovich 메카니즘에서 중요한 역할($N + OH \rightarrow NO + H$)을 하는 OH는 온도가 최고인 점을 기준으로 약간 산화제측에서 최고값을 나타내며, Fig. 6(c)인 경우가 다른 조건에 비해 다소 넓게 분포하는 경향을 보인다.

3.3 화염온도분포

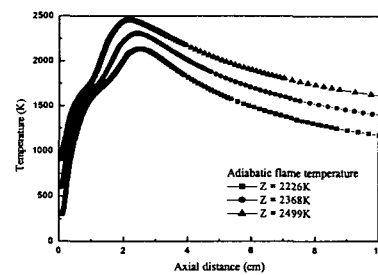
Fig. 7(a)는 초기 연료노즐의 공급온도를 변화시킨 경우로 단일화염 온도가 2226K에서 2499K로 증가하였을 때의 온도분포를 나타낸다. 초기 온도가 900K($T_{ad}=2499K$)인 경우 최고온도는 2454K으로 초기온도가 300K($T_{ad}=2226K$)보다 최고온도가 약 321K 높게 나타난다. 이것은 초기의 열용량의 첨가로 인해 단일화염온도가 상승하는 결과이다. Fig. 7(b)는 단일화염온도($T_{ad}=2226K$)를 일정하게 하기 위해 초기 공급온도를 600K, 900K로 설정한 후 연료측에 희석을 시킨 경우이다. 그림 내의 점선은 단일화염온도 2226K를 나타낸 것이다. 최고 온도의 경우에는 2133K~2151K로 약 20K 이내의 차이를 나타내었다. 최고온도의 변화는 거의 없었지만 $Z=0.412$ 인 경우 $Z=0$ 인 경우보다 최고온도에 도달하기 전까지의 온도구배가 완만한 경향을 보인다.

동일한 조건하에 CARS를 이용한 온도측정에서도 초기 공급온도만을 증가시킴에 따라 최고 화염온도가 증가하고, 연료측과 산화제측의 희석의 경우에도 최고온도 변화가 미약한 유사한 경향을 보였다.⁽¹³⁾ 또, Z 가 커질수록 최고온도위치가 화염 후류로 이동하는 것을 보여준다. 이것은 희석제의 증가로 인해 최고온도의 위치가 화염후류로 이동하는 것으로 사료된다.

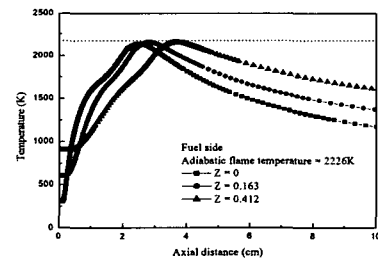
Fig. 7(c)는 산화제측에 희석을 한 경우로 연료측에 희석을 한 것과 유사하게 최고온도 변화는 거의 없고, 희석제의 증가에 의해 최고온도 위치가 화염후류로 이동하는 것을 보여준다. 하지만 연료측희석에 비해 최고온도가 발생하는 위치가 노즐팁으로 앞당겨져 있다.

3.4 C_2H_2 농도와 soot 분포

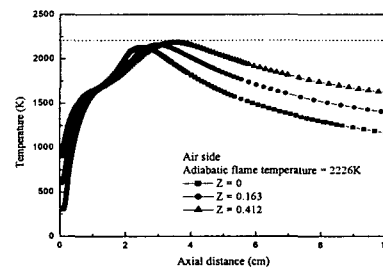
Fig. 8은 각 case I, II, III에 따른 C_2H_2 라디칼 분포를 나타낸다. C_2H_2 라디칼은 soot 생성의 지표로서 자주 언급된다.⁽¹⁴⁾ Case I의 경우, 희석을



(a) Case I (No dilution)

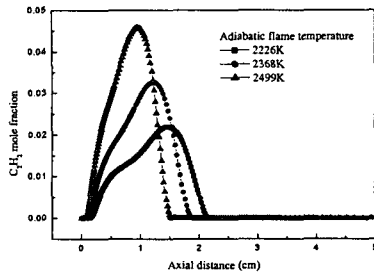


(b) Case II (Fuel-side dilution)

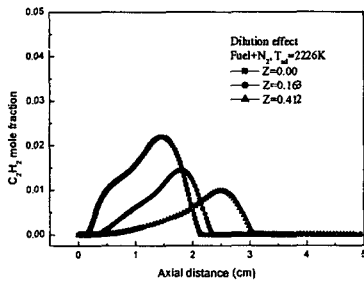


(c) Case III (Air-side dilution)

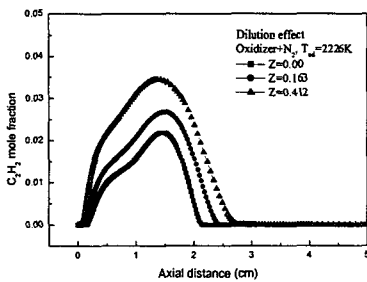
Fig. 7 Temperature distributions at experimental conditions



(a) Case I (No dilution)



(b) Case II (Fuel-side dilution)



(c) Case III (Air-side dilution)

Fig. 8 C₂H₂ distributions at experimental conditions

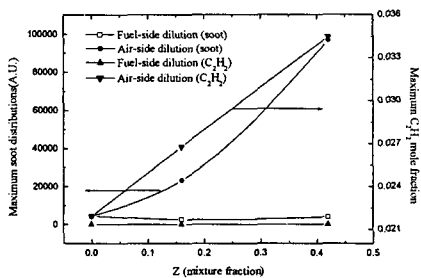


Fig. 9 Comparison of soot with C₂H₂

하지 않고, 초기예열온도만을 상승시킨 경우로 단일화염온도의 증가에 따라 물분율은 기준상태 ($T_{ad}=2226K$)에서의 0.02정도보다 약 2배 증가한 0.045 정도로 나타났다. 초기온도의 상승에 따른 연소속도의 증가로 인해 C₂H₂의 최고치가 노즐팁으로 앞당겨지는 경향을 보여주고 있다. 이 결과는 기연급한 soot 측정 결과에서 예상할 수 있는 동일한 경향을 나타내었다. 단일화염온도 ($T_{ad}=2226K$)를 일정하게하고, 연료측에 희석을 한 경우(Fig. 8(b))에는 Z가 상승할수록 줄어드는 경향을 나타내었다. 반면에 산화제측에 희석을 한 경우(Fig. 8(c))에는 Z가 상승할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 전반적으로 단일화염온도의 영향이 가장 크고, 산화제측에 희석한 경우가 연료측에 희석한 경우보다 C₂H₂의 물분율이 높게 나타났다.

본 실험의 Soot 측정의 결과와 Chemkin 코드를 사용하여 soot의 전구물질로 알려진 C₂H₂의 분포를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 희석분율에 따른 soot와 C₂H₂의 물분율의 최고값을 나타낸 것이다. 희석분율이 상승하며 따라 산화제측에 희석을 한 경우가 soot와 C₂H₂ 물분율이 증가하는 경향을 나타내었다. 연료측 희석의 경우, 희석분율의 상승은 soot와 C₂H₂ 물분율에 미치는 영향이 미비하게 나타났다.

4. 결론

메탄-공기 층류 확산화염에서 희석제 첨가에 따른 Z와 T_{ad}를 변수로 하여 soot 발생 특성, 화염구조, 온도분포와 C₂H₂ 농도에 대한 실험과 계산을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 화염내에 soot 분포는 온도의 영향이 지배적이고 단일화염 온도를 일정하게 하고, 희석만의 영향을 고려할 경우 연료측에 질소를 첨가한 경우가 산화제측에 질소를 첨가한 경우에 비해 soot 생성을 줄이는 데 효과적이다.

(2) 전형적인 확산화염 형태로 메탄 연료가 연료노즐로 분출되고 외부의 공기와 반응을 하여 OH 라디칼이 생성되며 OH 라디칼이 최고의 물분율을 가지는 부근에 최고온도가 발생하며, 산

화제측 회석에 경우 OH 라디칼이 다소 넓게 분포하는 것으로 나타났다.

(3) 초기공급온도의 상승으로 인한 축방향의 온도분포는 최고온도점이 단일화염온도 상승과 함께 최고온도가 상승하였으며, 연료측 회석의 경우 회석분율의 증가에 따라 온도구배가 완만해지는 것으로 나타났다. 산화제측 회석의 경우 회석분율의 변화에 따른 온도구배가 연료측 회석에 비해 완만하게 나타났다.

(4) Soot 농도 측정의 결과와 Chemkin 코드를 사용하여 soot의 전구물질로 알려진 C_2H_2 의 분포를 비교한 결과는 혼합분율이 상승하며 따라 산화제측에 회석을 한 경우가 soot와 C_2H_2 물분율이 증가하는 경향을 나타내었고, 연료측 회석의 경우에는 그 변화가 미미하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Miller, J. A. and Bowman, C.T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 15, pp. 287~338.
- (2) Drake, Michael C., and Blint, Richard J., 1991, "Relative Importance of Nitric Oxide Formation Mechanism in Laminar Opposed Flow Diffusion Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 83, pp. 185~203.
- (3) Smooke, M.D., Ern, A., Tanoff, M.A., Valdati, B. A., Mohammed, R. K. and Marran, D. F., 1996, "Computational and Experimental Study of NO in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame," *26th Symposium on combustion*, pp. 2161~2170.
- (4) Glassman, I. and Yuccarino, P., 1981, "The Temperature Effect in Sooting Diffusion Flames," *18th Symposium on Combustion*, pp. 1175~1183.
- (5) Wey, C., Powell, E. A. and Jagoda, J. I., 1984, "The Effect of Temperature on the Sooting Behavior of Laminar Diffusion Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 41, pp. 173~190.
- (6) Kermit C. Symth, Christopher R. Shaddix and David A. Everest, 1997, "Aspects of Soot Dynamics as Revealed by Measurements of Broadband Fluorescence and Flame Luminosity in Flickering Diffusion Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 111, pp. 185~207.
- (7) Du, D. X., Axelbaum, R. L. and Law, C. K., 1995, "Soot Formation in Strained Diffusion Flames Gaseous Additives," *Comb. and Flame*, Vol. 102, pp. 11~20.
- (8) Axelbaum, R. L. and Law. C. K., 1990, "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames," *23rd Symposium (Int.) on Combustion*, pp. 1517~1523.
- (9) Gilder, O. L., 1995, "Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane, Propane, and n-Butane Diffusion Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 101, pp. 302~310.
- (10) Feese, J. J. and Turns, S. R., 1998, "Nitric Oxide Emissions from Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition," *Comb. and Flame*, Vol. 113, pp.66~78.
- (11) Spalding, D. Brian, 1997, GENMIX : A General Computer Program for Two-dimensional Parabolic Phenomena.
- (12) Du, J. and Axelbaum, R. L. 1995, "The Effect of Flame Structure on Soot Particle Inception in Diffusion Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 100, pp. 367~383.
- (13) Eun, J. H., Lee, J. H., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2002, "Dilution and Thermal Effects of N₂ Addition on soot Formation in co-flow Diffusion Flame," *24th KOSCO SYMPOSIUM*, pp. 185~191.
- (14) Ni, T., Pinson, J.A., Gupta, S. and Santoro, R. J., 1995, "Two Dimensional Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of Laser Induced Incandescence," *Applied Optics*, Vol. 34, No. 30, pp. 7083~7091.