

층류 확산화염에서의 매연과 질소산화물의 배출 특성 : 공기측/연료측 희석제 첨가에 따른 영향

이종호*, 엄재호*, 박철웅**, 전충환***, 장영준†
(2002년 10월 4일 접수, 2003년 1월 16일 심사완료)

Soot and NOx Emissions in Laminar Diffusion Flames: Effects of Air-Side versus Fuel-Side Diluent Addition

Jong Ho Lee, Jae Ho Eom, Chul Woong Park, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

Key Words: NOx Emission (질소산화물 배출), Soot Formation (매연 생성), Air-Side Dilution (공기측 희석), Fuel-Side Dilution (연료측 희석), Dilution Fraction (희석분율), CARS(반스톡스 라만 분광법), PLII (평면 레이저 유도 백열법), CHEMKIN

Abstract

Present study has been conducted to see the relative effects of adding N₂ to fuel-side and air-side on flame structure, soot formation and NOx emissions. Experiments were carried out to ascertain to what degree chemical kinetics and/or molecular transport effects can explain the differences in soot formation and NOx emission by studying laminar diffusion flames. Direct photograph was taken to see the flame structure. CARS techniques was used to get the flame temperature profiles. And spatial distribution of soot could be obtained by PLII method. CHEMKIN code was also used to estimate the global residence time to predict NOx emissions at each condition. Results from these studies indicate that fuel-side dilution is more effective than air-side dilution in view of NOx emissions. However, air-side dilution shows greater effectiveness over fuel-side dilution in soot formation. And turbulent mixing and heat transfer problems were thought to be considered in practical applications.

1. 서론

전 세계적으로 대기오염에 대한 규제가 강화되고 있는 시점에서 이를 극복하기 위하여 다양한 연소기술이 연구되어지고 있다. 특히, 연소과정에서 발생하는 NO_x와 매연은 각각 산성비와 광·화학 스모그, 돌연변이 유발 및 암 발생의 원인이 된다. 매연의 생성 메커니즘 규명 및 저감방법에 관한 선행연구를 살펴보면, Axelbaum⁽¹⁾ 등은 대향

류 확산화염을 대상으로 첨가된 불활성 기체가 매연생성에 미치는 영향을 희석효과(Dilution effect)와 온도효과(Thermal effect)로 구분하여 연구하였다. 이로부터 매연생성 속도식을 연료 물분율과 온도의 함수로 제안하였다. Gülder⁽²⁾ 등은 단일화염온도(T_{ad})를 2400K로 고정시킨 후, 여러 종류의 연료에 대하여 산소농도가 매연생성에 미치는 화학효과(Chemical effect)를 관찰하였다. Santoro^(3,4) 등은 확산화염에서 연료의 종류와 유량을 변화시켜가며 초기온도에 따른 매연생성 메커니즘을 연구하였으며, Glassman⁽⁵⁾은 희석, 압력, 첨가제가 매연생성에 미치는 영향 등을 관찰하였다. 국내에서도 Hwang⁽⁶⁾ 등을 비롯하여 매연생성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

한편, NO_x 저감에 관한 선행연구는 다방면으로 이루어지고 있으므로, 이 중에서 낮은 산소농도와 높은 공급온도를 이용하는 배기가스 재순환

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : changyj@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 한국표준과학연구원, 레이저계측그룹

*** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

방식에 대한 연구만을 살펴보기로 한다.

Hopkins⁽⁷⁾ 등에 따르면 재순환 가스의 양이 동일한 경우, 연료측에 첨가한 경우가 산화제측에 첨가한 경우보다 NOx 저감에 있어 훨씬 효과적이라고 한다. 이에 대한 원인으로서 prompt NOx 발생량이 영향을 받았을 것으로 추정하고 있다.

Turns^(8,9) 등은 난류 제트화염에서의 NOx 배출 특성을 연료종류, 복사, 연료희석, 부분 예혼합 효과 등을 파라미터로 연구를 수행하였다. 또한, Feese⁽¹⁰⁾ 등은 동축 확산화염에서 연료, 공기의 온도를 각각 413K, 398K로 고정하였을 때, 질소첨가에 따른 NOx 배출 특성을 관찰하였다.

국내의 최근 연구동향을 살펴보면, Han⁽¹¹⁾ 등에 의한 산화제 제어 확산화염의 NO 생성 특성에 관한 수치 해석적 연구, Jang⁽¹²⁾ 등에 의한 부분 예혼합 화염제어에 의한 NOx 배출특성에 관한 실험적 연구, Sohn⁽¹³⁾ 등에 의한 고온 배기가스의 산소농도가 확산화염의 NOx 발생에 미치는 영향에 관한 연구 등이 있다. 이처럼 희석제 첨가가 매연생성 또는 NOx 저감에 미치는 효과에 관해서는 많이 연구되어져 왔다. 하지만 NOx와 매연을 동시에 연구한 경우는 적을뿐더러, 희석제를 첨가하는 위치에 따른 효과를 연구한 경우는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구는 희석분율⁽¹⁰⁾(Dilution fraction, Z)이라는 파라미터를 도입하여, Z와 T_{ad}를 실험 변수로 메탄-공기 확산화염의 NOx와 매연 발생 특성을 관찰하였다. Z가 일정함에도 다른 매연, NOx 발생 특성을 보이는 것은, 희석제 첨가에 따른 희석효과는 동일하지만 열적효과의 차이에서 기인한 결과라는 것을 의미한다.

이러한 화염을 연구함으로써 희석제 첨가의 위치에 따른 화염구조의 변화 및 매연생성, NOx 발생에 관한 메커니즘을 보다 잘 이해할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 희석제 첨가 위치를 변화시킴으로써, NOx 발생과 매연생성의 관점에서 최적의 연소조건을 찾고자 하였다.

화염구조는 직접사진을 통해 파악하였으며, 매연의 공간적 분포는 평면 레이저 유도 백열법(Planar Laser Induced Incandescence, PLII)을 이용하였다. 화염온도측정은 반-스톡스 라만 분광학(Coherent Anti-stokes Raman Spectroscopy, CARS)을 이용하였으며, 체류시간(Global Residence time)을 구함에 있어 CHEMKIN 코드를 이용하였다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치

2.1.1 동축류 버너

Fig. 1에 실험에 사용된 버너의 개략도를 나타내었다. 공급공기를 가열시키기 위해서 발열용량 2kW 전열기를 버너와 일체형으로 설치하였으며 공기를 가열한 후 열전달을 통해서 연료를 가열시키게 된다. 전열기의 안전과 공급온도를 일정하게 유지하기 위해서 히터 내부와 버너 출구 단에 K타입 열전대를 설치하여 공급온도를 일정하게 제어하였다. 공급되는 공기와 연료는 하류의 압력변화와 온도변화에도 설정유량을 유지할 수 있도록 MFC (Mass Flow Controller)를 이용하여 공급하였다. 본 실험조건 중 Tinlet = 600K 인 Case 2.3.4에 대해 버너의 연료측 출구와 산화제측 출구에서 각각 열전대와 CARS를 이용하여 온도를 측정해 본 결과, 연료측은 3지점에서 600±15K(CARS), 공기측은 600±20K로 제어가 가능하였다. 이렇게 함으로써 단일화염온도를 일정하게 유지할 수 있었다.

2.1.2 PLII 실험장치

Fig. 2에 PLII 실험을 위한 장치도를 나타내었으며, 세 부분으로 구성되어 있다.

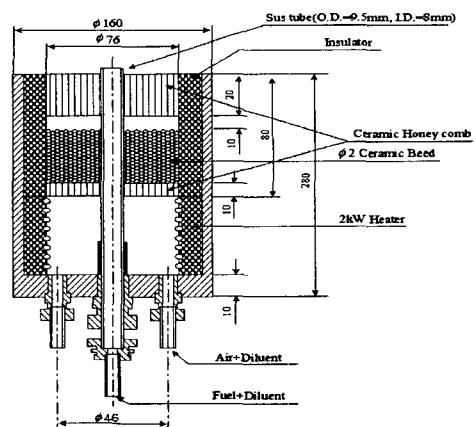


Fig. 1 Schematic of burner

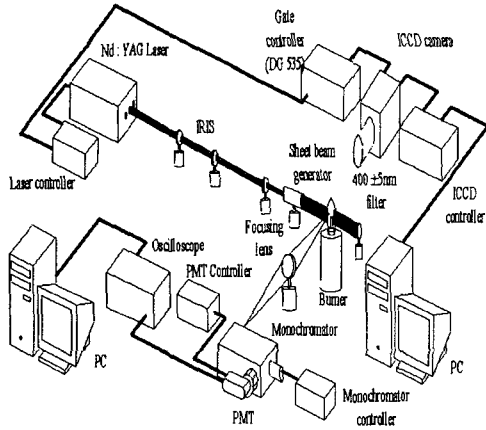


Fig. 2 Schematic of PLII system

신호발생을 위한 Nd:YAG 레이저(Quentel, YAG 980)의 광원부와 2차원 영상을 획득하기 위한 A/D 변환기, UV 렌즈(Nikon)와 광학필터(400±5nm)를 장착한 ICCD(PI, IMAX512), 점 측정을 위한 단색기를 포함하는 영상 및 신호 취득부, 획득된 신호와 이미지를 처리하는 데이터 처리부로 구성되어 있다.

2.1.3 CARS 실험장치

CARS 기술은 매우 정확한 화염온도 측정기술 중 하나로 여러 논문⁽¹⁴⁾에서 장치의 안정성 및 정확성이 검증되었다. 실험에 사용한 CARS 장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 광대역 이동형 CARS 장치에 사용되는 Nd:YAG 레이저의 이차 고조파는 펄스 당 에너지가 최대 200mJ, 펄스폭은 7~8ns, 반복도는 10Hz이며, 에너지의 대부분은(<80%) 무모드 색소레이저의 펌핑에 사용되어진다. 상자형 위상접합조건에 의해 발생된 CARS 신호는 광파이버를 거쳐서 단색기에 입사되며, 다채널 광분석기에서 스펙트럼이 구해진다. 이렇게 구해진 스펙트럼을 Sandia Code와 비교하여 온도를 얻을 수 있다.

2.2 실험조건

일반적으로 공업용 로는 약간 희박한 조건에서 이루어지며, 배기 측 산소농도는 1~3%정도이다. 이와 유사한 조건을 구현하기 위하여 연료측과 산화제측에 질소를 첨가하였는데, 희석 정도를

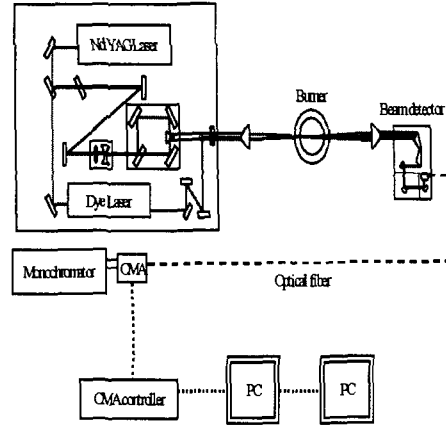


Fig. 3 Schematic of CARS system

나타내기 위한 파라미터, 희석분율(Dilution Fraction, Z)을 아래와 같이 정의⁽¹⁰⁾하였다.

$$Z = \frac{\text{희석제의 물}}{\text{이론 혼합기의 물}} \quad (1)$$

이는 연료측과 공기측의 희석제 질량분율 F_{dil} , A_{dil} 을 이용하여 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$Z = f_s \frac{F_{dil}}{1-F_{dil}} + (1-f_s) \frac{A_{dil}}{1-A_{dil}} \quad (2)$$

f_s 는 이론 혼합기에 대한 연료의 질량분율을 나타낸다. 산화제측 희석을 실현하기 위해서는 F_{dil} 을 영(zero)으로 놓고 A_{dil} 을 변화시키며, 연료측 희석은 A_{dil} 을 영으로 고정하고 F_{dil} 를 변화시켜 일정한 범위의 Z를 만들어 낼 수 있다.

NO 생성을 이해하기 위한 중요 지배인자는 연소가스가 화염영역을 통과하는 데 걸린 체류시간과 화염온도와의 관계에 있다(8-10)고 알려져 있다. 이러한 관계를 정량화하기 위하여, 본 연구에서는 화염의 중심축에 대하여 1900K 이상의 영역을 연소가스가 통과하는 하는데 걸린 시간을 체류시간으로 정의하였다. Feese⁽¹⁰⁾ 등은 thermal NO가 생성되는 하한온도 1500K를 사용한 반면, 본 연구에서는 1850K 이하에서는 thermal NO가 거의 발생하지 않고 1900K이상에서 급격히 증가한다⁽¹⁵⁾는 보고를 토대로 1900K으로 설정하였다.

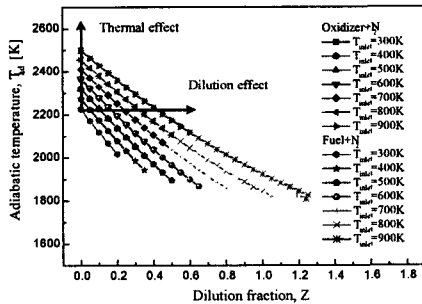


Fig. 4 Flammability limits

Table 1 Experimental conditions

Set	Q _{Fuel}	Q _{Air}	T _{inlet}	Z	Z _{st}	T _{ad}	Dilution	Case
A			300K	0	0.055	2226K	-	1
			600K			2368K	-	2
			900K			2499K	-	5
B	0.2 lpm	50 lpm	300K	0	0.055	2226K	Fuel side	1
			600K	0.163	0.190			3
			900K	0.412	0.334			6
C			300K	0	0.055	2226K	Air side	1
			600K	0.163	0.043			4
			900K	0.412	0.035			7

$$\tau = \int_{x_1(T=1900K)}^{x_2(T=1900K)} u^{-1}(x) dx \quad (3)$$

연료 및 공기의 초기온도는 300~900K의 범위에서 실험을 행하였으며, 이때의 단열화염온도는 2226~2499K이다. Fig. 4에 선행연구로서 행한 가연한계실험의 결과를 T_{ad}와 Z의 함수로 나타내었으며, 연료측에 희석제를 공급하면 공급속도가 빨라져서 화염이 불안정해 지는 것을 고려하여 안정연소영역 내에서 실험조건을 선정하였다.

이를 정리하면 Table 1과 같다.

Set "A"로부터 매연 생성 및 NO_x 배출에 미치는 T_{ad}의 영향을 관찰하였으며, Set "B"와 Set "C"로부터 일정한 T_{ad}(=2226K)에서 희석제 첨가 위치에 따른 희석분율(Z)이 매연 생성 및 NO_x 배출에 미치는 영향을 파악하였다.

2.3 실험방법

PLII 측정에서는 펄스 폭 9.7ns의 Nd:YAG 레이저 2차 고조파를 사용하였다. 평면광 생성기 길이 4.5cm, 폭 375μm의 평면광을 만든 후, 화염의 중심부에 조사하였다. 화염 내 매연분포의 2차원 측정은 Ni⁽¹⁶⁾와 Snelling⁽¹⁷⁾ 등의 연구를 참조하였다. 2차원 이미지를 획득함에 있어 가장 중요한 문제 중 하나는 빔 세기에 대한 LII신호의 정규화인데, 본 연구에서는 Shaddix⁽¹⁸⁾ 등의 연구결과를 참조하여, 빔의 일부를 직접 ICCD에 입사시켜 이를 행하였다. 선형영역(linear regime)에서 LII 신호는 일정 임계값 이상의 빔 세기와 비례관계를 보이지만, 본 실험에서는 이 임계값이 크지 않다고 판단하여 빔 세기가 영(zero)부터 LII 신호와 선형적으로 비례한다고 가정하였다.

신호로부터 노이즈를 제거하기 위해, 측정과장 400nm, 레이저 세기는 선형영역인 15mJ/p, 100ns의 게이트 폭을 선정하였으며, ICCD로 획득한 이미지는 100회 적산하였다.

산란광, PAH와 C₂분자 등에 의한 노이즈를 제거하기 위해서는 광학필터(400±5nm)를 사용하였으며, 화염길이의 절반이 되는 높이(y/L_r=0.5)에서 반경방향으로 1mm 간격으로 온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염구조 관찰

Fig. 5에 ICCD를 이용하여 측정된 화염길이를 나타내었다. 이는 화염 내 입자가 존재하는 체류 시간과 NO_x 발생량과의 관계를 알아보기 위한 것이다. 화염 길이가 길어진다는 것은 그만큼 연소가 지연된다는 것을 의미하는 것으로 생각된다. 예상했던 바처럼, Set "A"의 경우가 가장 짧은 화염길이를 나타내었으며, Set "B"의 경우 희석제를 첨가함에 따라 별다른 변화가 없는 반면에, Set "C"의 경우는 늘어나는 결과를 보였다. 이는 Roper⁽¹⁹⁾의 실험적 결과와도 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다 하겠다. 원형 포트형상을 가지는 버너에 대한 Roper 식은 다음과 같다

$$\frac{H}{Q} = \left\{ 4\pi \cdot D_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{s} \right) \right\}^{-1} \cdot \left(\frac{T_0}{T_f} \right)^{0.67} \quad (4)$$

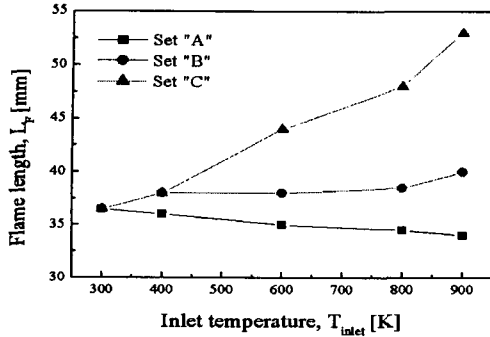


Fig. 5 Flame length at each condition

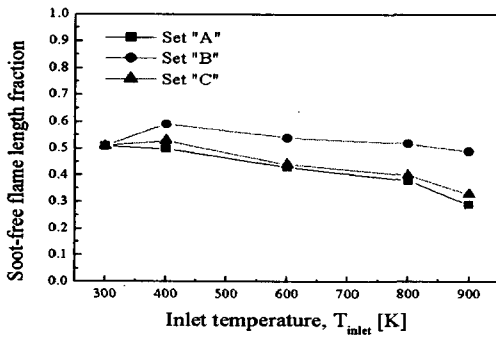


Fig. 6 Soot-free flame length at each condition

단, D_0 는 T_0 에서의 확산계수, S 는 이론공연비, T_0 는 공기의 초기공급온도, T_f 는 특성화염온도, H 는 확산화염길이, Q 는 T_0 에서의 연료유량을 나타낸다. 식 (4)를 이용하여 $Z = 0.15$ 일 때 화염길이를 계산해 보면, 공기측 희석은 15%, 연료측 희석은 8% 늘어난다. 실험에 의한 화염길이는 각각 18%, 5% 늘어나는 결과를 보였다.

Fig. 6은 매연이 없는 화염길이부분(soot-free flame length fraction)을 측정하여 나타내었다. 이는 각 조건에서의 화염구조 및 전체적인 매연 발생을 예측하기 위한 목적으로, Set "B"의 경우에 매연이 없는 화염길이가 Set "A" 나 "C" 보다 커 매연 발생이 가장 적을 것으로 예상된다.

3.2 매연분포 측정

Fig. 7에 각 실험조건에 대한 2차원 LII 이미지 나타내었다. LII 신호의 좌우 비 대칭성을 발견할 수 있는데, 화염 내 매연의 존재에 의한 빔의 소멸에 의한 결과로서 빔 세기의 감소가 적지

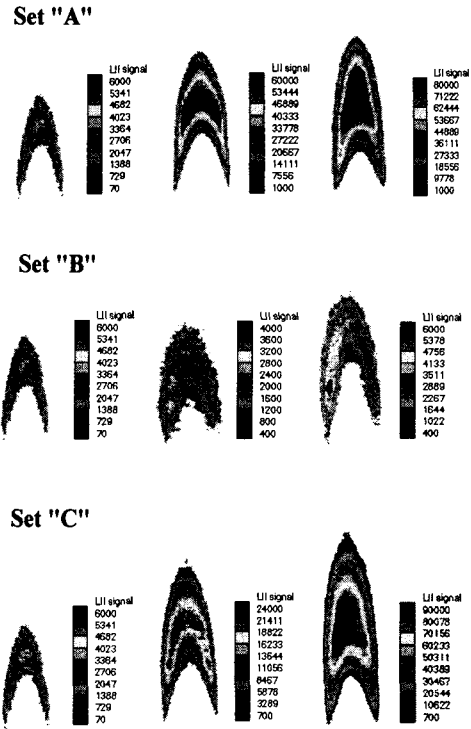


Fig. 7 PLII images at each condition

않음을 보여 주고 있다. 또한 빔 세기가 선형영역이라는 것을 뒷받침해 주는 결과라 하겠다.

이러한 희석제 첨가가 매연생성에 미치는 영향을 자세히 살펴보기 위하여, $y/L_f=0.9$ 위치에서의 LII 신호를 Fig. 8에 나타내었다. 신호세기의 차이가 심해서 다른 스케일로 나타내었으며, 그림 (a)의 경우는 최대값을 10^5 로, 그림 (b), (c)의 경우는 10^4 로 나타내었다.

그림 (a), (b), (c)에서 초기온도가 900K인 경우 최대 강도를 비교해보면, 연료측 희석의 경우가 가장 낮은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 희석제를 첨가하지 않은 경우와 산화제측에 첨가한 경우는 연료측 희석의 경우보다 각각 80배, 8배정도 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

이러한 결과는 희석제를 연료측에 첨가하였을 때가 첨가하지 않거나 공기측에 첨가한 경우에 비해 화학종과 속도분포에 있어 현저한 차이를 가져오기 때문이다.

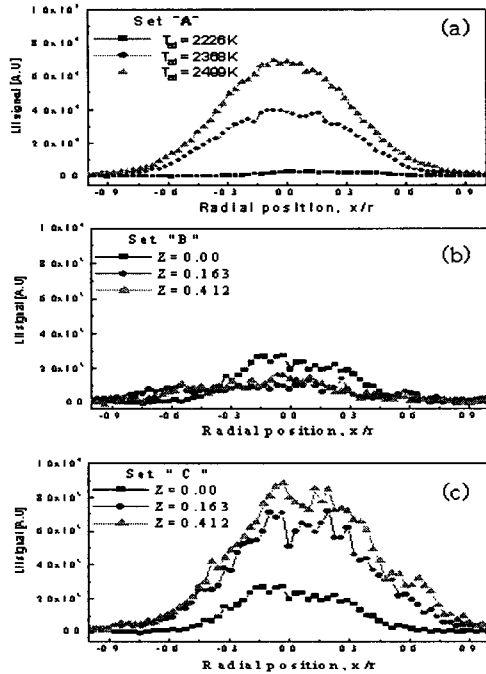


Fig. 8 PLII signals at each condition (y/Lf=0.9)

연료측 희석에 있어 Z가 0에서 0.15로 바뀐 경우, 연료(CH₄)의 물분율은 1에서 0.39로 떨어지고, 질소의 물분율은 0에서 0.61로 급격한 변화를 보이게 된다. 반면에, 공기측 희석의 경우 질소가 공기의 주 구성요소이므로 질소 첨가는 산화제측의 화학적 변화에 있어 미약한 영향밖에 미치지 못하는 것이다. 즉, 산소농도는 21%에서 18%로, 질소농도는 79%에서 82%로 바뀌게 된다. 한편, 희석이 매연발생에 미치는 영향을 알아보기 위해 Du⁽²⁰⁾ 등이 제안하는 파라미터, Zst와 비교해 볼 때, 연료측 희석의 경우는 Z가 증가할수록 Zst가 증가하지만 공기측 희석의 경우는 이와 상반된 경향을 보였다. 이는 Zst가 증가함에 따라 화염은 연료측으로 이동하고 soot inception은 억제된다는 보고와 잘 일치하는 결과로, 비록 단일화염 온도가 같더라도 산화제 희석조건이 연료 희석 조건에 비해 soot 생성이 일어나기 쉽다는 것을 의미하며, 이는 본 실험의 결과와 잘 일치한다.

3.3 화염온도 측정

화염온도가 매연생성에 미치는 영향을 알아보

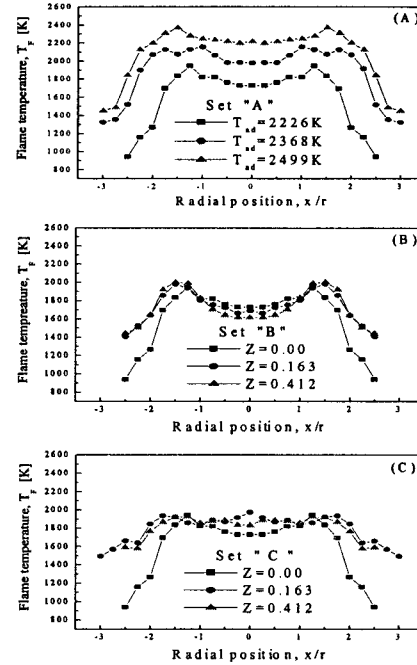


Fig. 9 Radial temperature profiles (y/Lf=0.5)

기 위하여, y/Lf=0.5인 높이에서 반경방향으로의 온도분포 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

그림 (a)에서 보듯, 초기온도를 증가시킴에 따라 화염 온도는 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 반면에, 그림 (b), (c)에서 보는 것처럼 희석에 의한 화염온도의 변화는 연료측과 산화제 측이 유사한 경향을 보여준다. 다만 연료측희석의 경우 연료농도의 감소로 반응이 지연되어, 중심 축근처에서 초기온도가 낮을수록 오히려 높은 화염온도를 나타내고 있다. 또한, 1900K이상의 고온영역도 산화제 희석에 비해 더 넓게 나타나고 있다.

3.4 NOx 배출특성

NOx 측정은 노즐 팁으로부터 80mm 떨어진 지점에서 가스분석기(COSA6000)를 사용하여 측정하였으며 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Set "A"의 경우, Tad가 높아질수록 NOx 발생량이 많아지고 있다. 이는 Zeldovich 메커니즘에 근거한 화염온도의 영향이라 사료된다.

연료측 희석의 경우(Set "B")가 산화제측 희석(Set "C")에 비해 NOx 배출량이 많은 것을 볼 수 있다. 이는 화염길이 결과에서 보듯, 휘염의

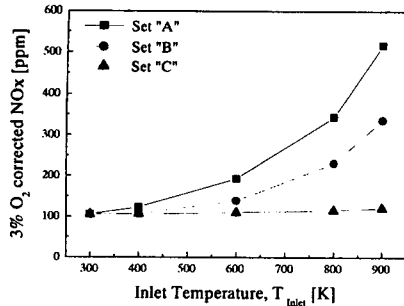


Fig. 10 Characteristics of NOx emissions

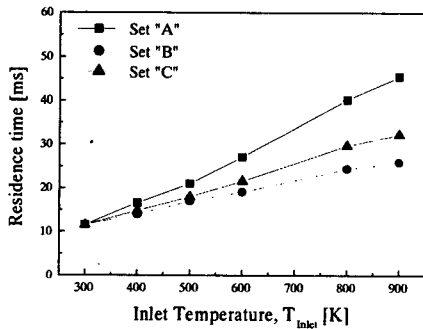


Fig. 11 Estimation of Residence time

분포영역이 적어짐에 따른 매연입자로의 열전달이 줄어들어 전체적인 화염온도가 높게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 11에 NOx 발생의 주요 인자인 체류시간을 나타내었다. 본 연구에서는 화염내의 속도 측정을 행하지 않았기 때문에, CHEMKIN 코드에 의한 화염온도와 속도분포를 이용하여 계산하였다. 다른 인자들이 같다고 가정하면, 화염이 길수록 체류시간 및 NOx 발생은 약간 줄어들 것이라고 한다.⁽¹⁰⁾ 왜냐하면 제트출구부터 화염 팁보다도 훨씬 더 후류까지 부력에 의해 속도가 꾸준히 증가하기 때문이다. 즉, 화염이 길수록 평균속도는 커져서 체류시간은 짧아진다는 것이다. 실제 Fig. 5를 보면, 공기측 회석이 연료측 회석에 비해 화염길이가 길게 나타나는 것을 볼 수 있다.

반면에, 본 연구에서 계산한 체류시간은 연료측 회석(Set "B")경우가 공기측 회석(Set "C")경우보다 더 짧게 나타났는데, 이는 연료측에 회석

제를 첨가한 경우 NO 발생에 있어 Zeldovich 메커니즘에 의한 thermal NO 뿐만 아니라 prompt NO의 생성 메커니즘이 지배적이기 때문인 것으로 사료된다.

향후 회석 방식에 따른 NO 생성 메커니즘에 대한 정량적인 측정이 필요한 부분이라 하겠다.

4. 결론

메탄-공기 층류 확산화염에서 회석제 첨가에 따른 Z 와 T_{ad} 를 실험변수로 매연의 2차원농도분포, 온도분포 파악, NOx 배출특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 화염구조관찰에 있어, 산화제측 회석의 경우가 가장 긴 화염길이를 나타내었으며, 이로부터 전체적인 NOx 배출특성을 예측할 수 있었다.

(2) 회석제 첨가에 따른 매연생성은 연료측 회석의 경우 가장 효과적으로 저감되었다. LII 신호의 최고강도를 비교했을 때, 첨가하지 않은 경우와 산화제측 첨가의 경우 연료측 회석에 비해 각각 80배, 8배정도 큰 값을 가짐을 확인하였다.

(3) 회석제를 첨가하였을 경우 온도분포는 전체적으로 유사한 경향을 띄었다. 그러나 1900K 이상의 고온영역은 연료측 회석의 경우에 있어 좀 더 넓게 분포함을 알 수 있었다.

(4) NOx 배출특성은 화염구조 결과와 잘 일치하는 경향을 보였다. 한편 CHEMKIN 코드를 이용하여 구한 체류시간과의 결과로부터 prompt NO 생성 메커니즘이 NO 생성에 지배적인 영향을 미침을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Axelbaum, R. L. and Law, C. K., 1990, "Soot Formation and Inert Addition in Diffusion Flames," *23rd Symposium on Combustion*, pp.

- 1517~1523.
- (2) Gülder, 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.
- (3) Santoro, R. J. and Semerjian, H. G., 1984, "Soot Formation in Diffusion Flames: Flow rate, Fuel species and Temperature effects," *20th Symposium on Combustion*, pp. 997~1006.
- (4) Santoro, R. J., Yeh, T. T., Horvath, J. J. and Semerjian, H. G., 1987, "The Transport and Growth of Soot Particles in Laminar Diffusion Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 53, pp. 89~115.
- (5) Glassman, I., 1998, "Sooting Laminar Diffusion Flames: Effect of Dilution, Additives, Pressure, and Microgravity," *27th Symposium on Combustion*, pp. 1589~1596.
- (6) 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 C₃ Chemistry," *27th Symposium on Combustion*, pp. 1531~1538.
- (7) Hopkins, K. C., Czerniak, D. O., Youssef, C., Radak, L. and Nylander, J., 1991, Paper-JPGC-EC-3
- (8) Turns, S. R. and Myhr, F. H., 1991, "Oxidizes of Nitrogen Emissions from Turbulent Jet Flames: Part I- Fuel Effects and Flame Radiation," *Comb. and Flame*, Vol. 87, pp. 319~335.
- (9) Turns, S. R. and Myhr, F. H., R. V. Bandaru. and E. R. Maund., 1993, "Oxidizes of Nitrogen Emissions from Turbulent Jet Flames: Part II- Fuel Dilution and Partial Premixing Effects," *Comb. and Flame*, Vol. 93, pp. 225~269.
- (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) Han, J. W. and Lee, C. E., 2002, "Numerical Study on Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-Controlled Diffusion Flames," *KSME*, Vol. 26, No. 5, pp. 742~749.
- (12) Jang, J. Y. and Kim, T. K., 2002, "Combustion Radicals and NO_x Emissions Characteristics by Control of Partially Premixed Flames," *KSME*, Vol. 26, No. 4, pp. 561~569.
- (13) Sohn, H. S. and Kim, H. Y., 2002, "Effects of Oxygen Concentration on the NO_x Emission of Non-premixed Flame in Hot Exhaust Gas," *KSME*, Vol. 26, No. 6, pp. 833~841.
- (14) Eckbreth, A. C., 1980, "CARS Thermometry in Practical Combustors," *Comb. and Flame*, Vol. 39, pp. 133~147.
- (15) Lefebvre, 1999, "Gas Turbine Combustion," 2nd Ed, Taylor & Francis. pp. 324~344.
- (16) 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.
- (17) Snelling, D. R., Thomson, K. A., Smallwood, G.J. and Gülder, O.L., 1999, "Two-Dimensional Imaging of Soot Volume Fraction in Laminar Diffusion Flames," *Applied Optics*, Vol. 38, No. 12, pp. 2478~2485.
- (18) Shaddix, C. R. and Smyth, K. C., 1996, "Laser-Induced Incandescence Measurement of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flame," *Comb. and Flame*, Vol. 107, pp. 418~452.
- (19) Roper, F. G., Smith, C. and Cuninghame, A. C., 1977, "The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part II. Experimental Verification," *Comb. and Flame*, Vol. 29, pp. 227~234.
- (20) 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.