

메탄/공기 층류 부분 예혼합화염의 화염구조와 NO_x 배출특성: 예혼합 인자의 영향

오정석* · 정용기* · 전충환** · 장영준**†

Flame Structure and NO_x Emission Characteristics in Laminar Partially Premixed CH₄/Air Flames: Effect of Premixing Degree

Jeong Seog Oh, Yong Ki Jeong, Chung Hwan Jeon and Young June Chang

ABSTRACT

In this paper, the study of effects of flow variables on flame structure and NO_x emission concentration was performed in co-axial laminar partially premixed methane/air flames. the objectives are to reveal its effect as parameters were varied and to understand the correlation between flame structure and NO_x emission characteristics in the reaction zone. equivalence ratio(ϕ), fuel split degree(σ), and mixing distance(x/D) were defined as a premixing degree and varied within 1.36~3.17(equivalence ratio), 50~100(fuel split degree), and 5~20(mixing distance). the image of OH* and CH*, and NO_x concentration were obtained with an ICCD camera and a NO_x analyzer. additionally the maximum intensity location of OH* chemiluminescence and CH* chemiluminescence were measured to compare each flame structures. In conclusion flame structure and NO_x emission characteristics were changed from diffused to premixed flame when mixing degree was on the increase. the main effect on flame structure and NO_x production was at first equivalence ratio(ϕ), and next fuel split degree(σ), and finally mixing distance(x/D).

Key Words : co-axial flow, chemiluminescence, NO_x emission

기 호 설 명

ϕ : equivalence ratio
 σ : fuel split percentage
 x/D : mixing distance

x : inner tube recess distance
 D : inner tube diameter

1. 서 론

부분 예혼합 화염은 예혼합 화염과 확산화염영

역의 사이에 존재하는 것으로 반응지역이전에 연료의 흐름에 이론공연비 보다 적은양의 공기를 혼합함으로써 만들어지며[1] 비예혼합 화염(non-premixed flame)에 비하여 배기 배출 수준이 낮고 희박 예혼합 화염(lean premixed flame) 보다 안정적인 상태를 가지는 장점이 있다고 한다.[2]

부분 예혼합 조건의 혼합기상태는 가스터빈(gas turbine combustor), 가정용 난방기(gas-fired

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부

† 연락저자

E-mail : changyj@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

domestic appliances), 복사튜브(radiant tube), 로(furnaces) 등의 많은 연소기에서 일어나고 있고 환경 문제에 대한 관심증가와 함께 배기 배출물 저감방법과 연소진단에 대한 연구가 이루어져 왔다.

이러한 연구의 연장선상으로서 본 논문에서는 메탄과 공기를 이용한 이중 동축 부분 예혼합 화염에 대한 실험을 수행하였다.

Lee 등[3, 4]은 난류 부분 예혼합 화염을 구성하는데 있어 안쪽관에 공기를 희석시킨 경우, 안쪽관과 바깥쪽관의 상대속도비 증가는 화염길이를 증가시키고, 혼합길이의 증가는 화염길이에 미치는 영향은 미비하다고 보고하고 있다.

D.A. Greenhalgh 등[5]은 당량비가 과잉인 예혼합화염과 희박한 예혼합 화염을 분사한 부분 예혼합 대향류 화염에 있어 삼지화염에 관한 연구를 수행하였다. 그들의 결과에서 당량비와 신장률은 화염의 형상을 변화시키고, 소염을 발생시킨다고 보고하고 있다.

Gore 등[1, 6]은 메탄-공기 층류와 난류 부분 예혼합 화염 연구에서 당량비 증가에 따라 이중 화염구조가 생겼으며 가시화염 길이의 증가에 따라 EINOx 또한 이에 비례하여 증가함을 보여줬다. 이는 화염의 신장률(strain rate)이 체류시간(residence time) 및 복사열손실(radiative heat loss), 화염의 온도와 관련이 있음을 의미한다.

Nishioka와 Takeno 등[7, 8]은 여러 조건의 메탄-공기 부분 예혼합 화염에서 CHEMKIN을 사용하여 동축류와 대향류 버너에서의 당량비에 따른 EINOx를 NOx 메카니즘 별로 구분하였다. 이의 결과로 당량비 1.5~3.0에서는 NOx의 발생량 또한 거의 로그 함수적으로 증가하였으며 대향류(counterflow)에서는 열적 메카니즘(thermal NO mechanism), 동축류(coflow)에서는 급속 메카니즘(prompt NO mechanism)의 영향이 지배적이라고 보고하고 있다.

선행연구에서 부분 예혼합 화염에서의 예혼합 인자에 대한 연구가 많지 않았고, 또한 이중동축관에서 안쪽관에 공기를 공급한 경우가 대부분이었으므로, 본 연구에서는 예혼합 인자를 정의하여 안쪽관으로 연료를 보낸 경우를 포함한 각각의 조건에서 화염구조의 변화와 이때의 질소산화물 배기배출 특성을 살펴보았다.

따라서 본 논문의 목적은 예혼합 인자가 화염구조와 질소산화물 생성에 미치는 영향과 상호관계에 대한 연구이다.

2. 실험적 연구

2.1 실험장치 및 방법

실험장치는 예혼합 인자에 의한 화염구조의 변

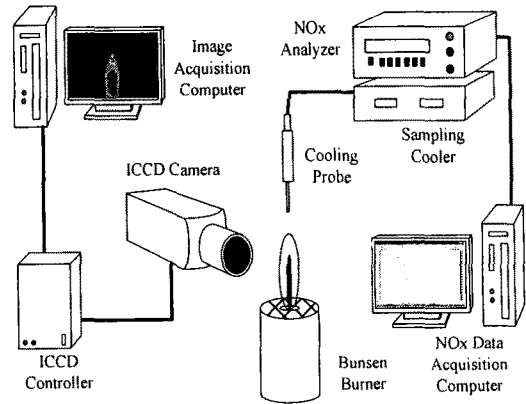


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

화와 이때의 배기배출물의 특성을 파악하기 위하여 아래의 Fig. 1과 같이 구성하였다. 장치는 크게 본젠버너(Bunsen burner)와 ICCD 카메라(PI MAX, Princeton Instrument), 그리고 NOx 분석기(M-200AH, Teledyne instruments)의 세부분으로 나뉘어 진다.

먼저 연소기는 2mm 내경의 안쪽관과 8mm 내경의 바깥쪽관으로 구성된 이중동축관을 사용하였으며 외부에는 화염의 안정화를 위하여 일정량($Q_{\text{sec.air}}$)의 공기를 분사하였다.

ICCD 카메라로서 가시화염, OH*, CH* 자발광의 화상을 간섭필터($307.1 \pm 1.5\text{nm}$, $430.7 \pm 1.5\text{nm}$)를 사용하여 각각 50ms의 노출간격으로 50회씩 누적한 평균값으로 취득하였다.

질소산화물 가스 취집시 프로브와 쿨러를 사용하여 냉각하였으며 측정위치는 선행연구를 참고하여 축방향으로 농도의 변화가 일정해지는 화염 높이의 두 배로 하였다.[9, 10] 이 때 쉴드(shield)는 사용하지 않았으며 사용한 경우(confined)와 비교하였을 때 정성적인 차이는 나타나지 않았다. Lyle 등[1]의 연구에 의하면 쉴드를 씌운 경우(unconfined) NOx의 양이 쉴드에 의한 복사의 영향으로 조금 증가하였고 외부공기침투의 영향이 적어 CO와 HC의 농도가 상대적으로 증가하였다.

2.2 실험조건

실험은 상온의 대기압조건에서 실행되었으며 연료로 메탄(CH_4 , 99.95%)을 분당 200cc로 일정하게 공급하였고 바깥쪽관으로 들어가는 압축공기(400~1400 cc/min)를 사용하여 당량비를 조절하였다. Table 1에 예혼합 인자의 범위와 실험조건을 나타내었다.

예혼합 정도를 정량화하기 위하여 예혼합 인자(ϕ , σ , x/D)를 정의하였으며 예비실험을 통해 역화, 부상화염, 그리고 소염조건은 실험범위에서

Table 1 Experimental conditions

parameter	range
ϕ	1.36, 1.59, 1.90, 2.38, 3.17, 4.76
$\sigma(\%)$	50, 75, 100
x/D	0, 10, 20
$Q_{fuel} = 200$ [cc/min]	
$Q_{pri\ air} = 400 \sim 1200$ [cc/min]	
$Q_{sec\ air} = 55$ [slpm]	

제외하여 안정된 상태의 화염을 대상으로 하였다.

예혼합 인자의 물리적인 의미로서 당량비(ϕ)는 거시적인 혼합기의 농후하고 열은 상태를 의미하고 연료분배율(σ)은 다음의 식(1)로 정의되며 이는 국소적인 혼합기 농도의 상태를 나타낸다.

본 실험에서는 50, 75, 100%의 세 조건에서 수행되었는데 연료분배율(σ) 50%일 때 연료가 안쪽 관으로 100cc/min, 바깥쪽 관으로 100cc/min 들어가고 100%일 때는 연료가 모두 바깥쪽 관으로 들어가므로 이 때 예혼합이 가장 잘 된 상태가 된다.

$$\sigma = \left(1 - \frac{Q_{fuel, inner}}{Q_{fuel, total}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

혼합거리(x/D)는 버너출구(burner exit)에서의 연소이전에 연료와 산화제가 혼합되는 길이를 무차원화 한 것으로 x 는 버너출구로부터 안쪽 관까지의 수직거리, D 는 안쪽관의 직경을 의미한다. 즉, 연료분배율(σ)과 혼합거리(x/D)가 증가할수록, 당량비(ϕ)는 줄어들수록 예혼합 정도는 증가함을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염구조의 변화

3.1.1 가시 화염길이의 변화

가시화염의 길이변화를 통해 연료입자가 연소하는 영역의 변화를 알 수 있으므로 부분 예혼합 정도를 거시적으로 판별할 수 있을 것으로 생각된다. 본 논문에서는 선행연구를 참고하여 화염 길이를 어두운 방에서 화염 밑단부터 화염후류에서의 강도변화를 인지할 수 있는 제일 끝단까지의 거리로 정의하였다.[12, 13]

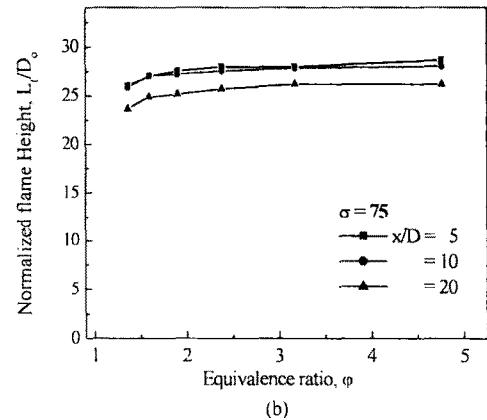
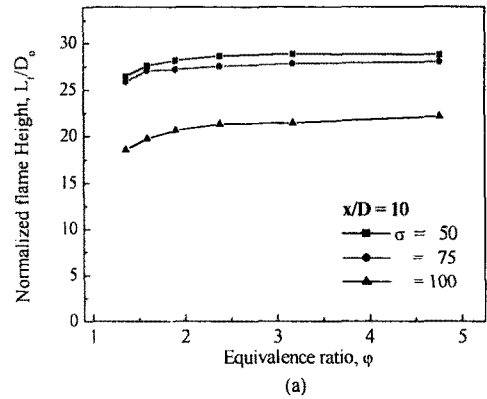


Fig. 2 Normalized flame height of visible image plotted as a function of ϕ at (a) $x/D=10$, (b) $\sigma=75$.

Fig. 2는 예혼합 인자에 의한 가시화염의 화염높이의 변화를 보여준다.

Fig. 2 (a)에서 혼합거리(x/D)를 10으로 고정하고 연료분배율(σ)을 감소시켰을 때 같은 당량비에서의 화염의 길이는 증가하였다. 이는 예혼합 정도가 증가할수록 혼합기가 잘 섞이게 되고 짧은 거리에서 연소가 이루어짐을 의미한다. 그러나 당량비(ϕ)가 증가하여 2.38 이후부터는 화염 길이는 거의 변화하지 않았다. 이는 연료가 200 cc/min으로 고정되어 있으므로 연소가 일정거리 내에서 완료되는 것으로 생각된다.

Fig. 2 (b)에서도 혼합거리(x/D)가 20일 때 예혼합 정도가 증가하여 화염의 길이는 상대적으로 짧아졌으나 정성적인 차이는 연료분배율에서의 영향보다 적었다. 이로는 화염구조에 미치는 예혼합의 영향이 혼합거리(x/D)보다는 연료분배율(σ)이 크게 미침을 알 수 있다.

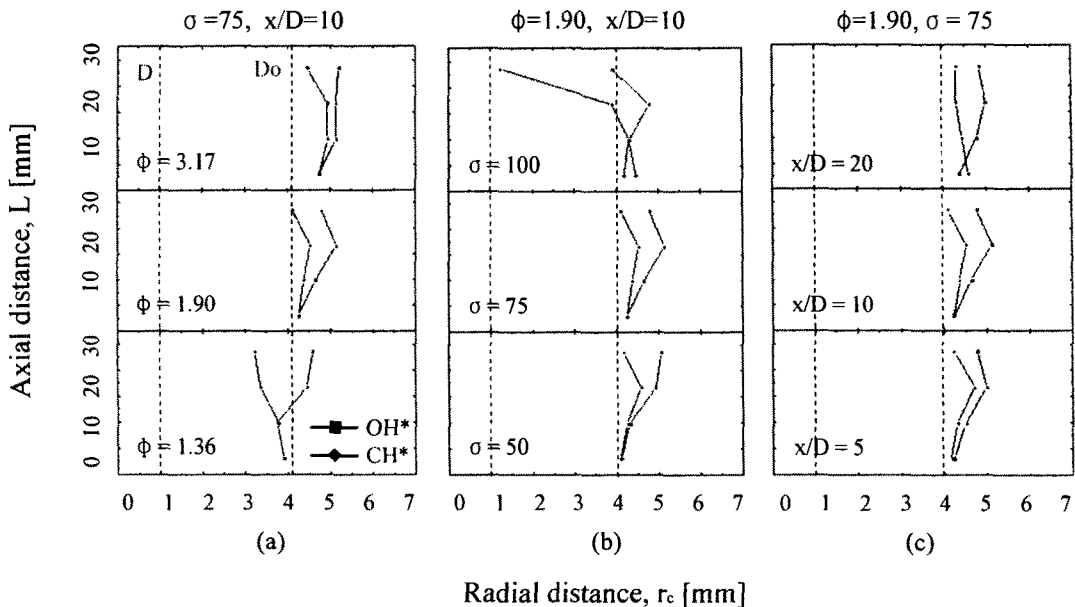


Fig. 3 Location of peak intensity of OH* and CH chemiluminescence for premixing degree

3.1.2 OH*와 CH* 자발광의 위치비교

Fig. 3는 예혼합 정도에 따른 축, 반경방향에서의 OH*와 CH* 자발광의 최고 강도점을 나타내었다.

라디칼(radical)은 연소과정에 이온원자와 같은 불완전한 중간 생성물로서 화학반응에 관여하므로 연소진단에 쓰이고 있다. OH*은 연소의 화학반응에 폭넓게 관여하므로, 자발광($A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$)은 화염에서의 반응영역을 나타내고 열방출의 지표로 사용되어 왔다.[14] CH*은 급속 메카니즘에 의한 질소산화물(prompt NOx) 생성에 관여한다.

Thomas와 Kermit 등[15]에 의하면 CH*의 형광신호를 OH*의 형광신호에 비하여 반응이 일어나고 있는(reaction is occurring) 지점을 나타내는 지표로서 사용하고 있고, Blevins 등[16]의 연구에 의하면 자발광($A^2\Delta - X^2\Pi$ transition)은 형광신호보다 중심축에 가까이 생성되고 있으므로 CH* 자발광의 최고점 위치를 통한 예열대(preheat zone)에서의 반응영역의 기준점으로 볼 수 있다.

Fig. 3에서의 자발광은 경로적분(line of sight)된 값으로 CH* 자발광이 중심축 가까이에서 OH* 자발광은 축방향에서 상대적으로 멀리 떨어져있다. 라디칼의 자발광은 형광신호(LIF)나 아벨변환(Abel inversion) 등의 방법에 의한 단면 정보에 비하여 생성 메카니즘과 생성위치의 측면에서 동일하지는 않으나 본 실험에서의 그 경향성은 같을 것으로 생각된다.

Fig. 3 (a)는 연료분배율(σ)과 혼합거리(x/D)를

각각 75%와 10으로 고정해두고 당량비(ϕ) 변화에 따른 OH*, CH* 자발광의 최고 강도점의 위치 변화를 나타낸다. 당량비(ϕ)가 증가할수록 최고 강도의 위치는 중심축에서 멀어지며 높이가 증가에 따라 두 자발광의 최고 강도 지점은 점차 좁아져 예혼합 화염의 형태에서 확산화염의 형태로 변화하고 있다.

Fig. 3 (b)는 연료분배율(σ) 증가에 따른 자발광의 위치를 나타내고 있다. 연료분배율(σ)이 증가할수록, 측정높이가 증가할수록 두 자발광의 상대적 위치는 벌어지며, 특히 높이가 26 mm 부근에서의 연료분배율(σ) 100%일 때 최고 강도점의 위치는 중심축방향으로 가장 많이 벌어지게 되는데 이는 예혼합 증가에 따른 이중 화염구조를 나타낸다.

Fig. 3 (c)의 경우 혼합거리(x/D)에 따른 화염구조의 변화를 나타낸다. 혼합거리(x/D)의 증가는 예혼합 정도의 증가를 의미하므로 그 값이 증가함에 따라 화염의 구조는 확산화염에서 예혼합 화염의 형태로 변화함을 예상할 수 있으며 두 자발광 최고 강도점 폭의 변화는 이러한 화염의 구조변화를 보여주고 있다.

CH*과 OH* 자발광이 최고 강도를 나타내는 지점 사이에 온도가 최고인 지점이 존재하며 반응물의 화학양론적 평형상태(stoichiometric equilibrium)가 존재할 것으로 생각된다.[15, 16]

또한 화염이 예혼합 상태에서 확산 화염의 상태로 감에 따라 화염의 두께(flame thickness)는 줄어들음을 알 수 있다.

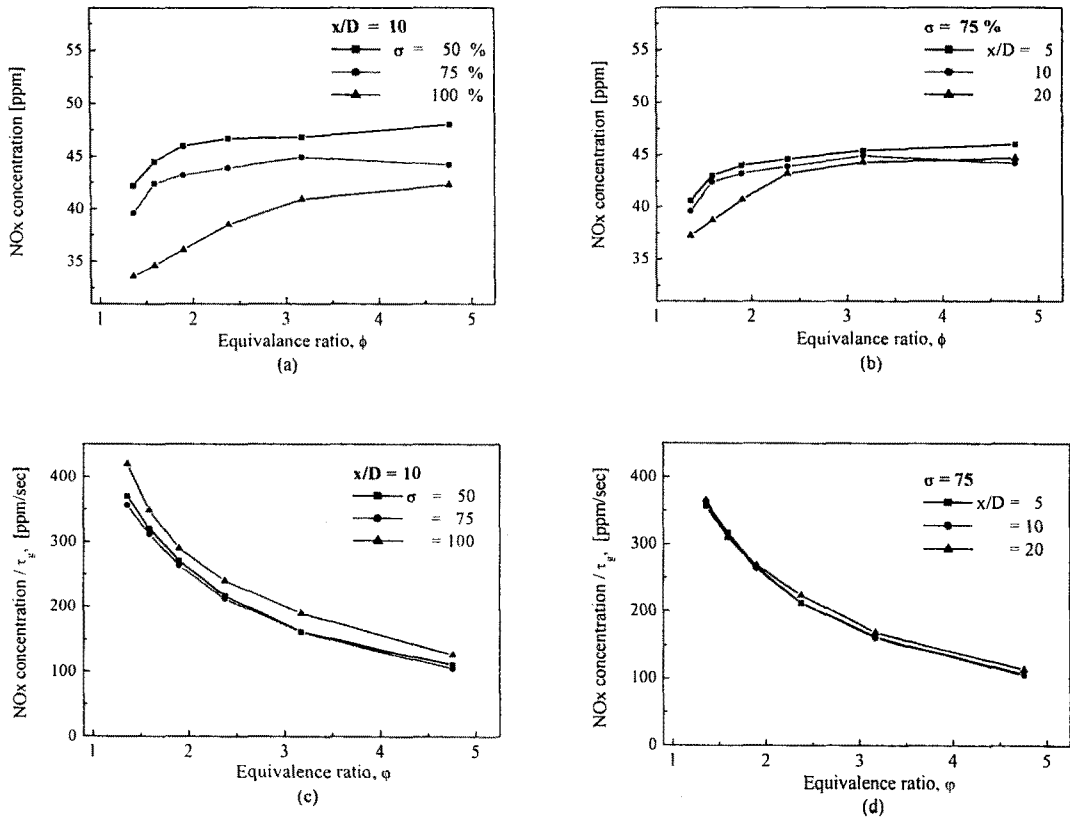


Fig. 4 Effect of mixing degree on NOx concentration and NOx emission of global residence time plotted as equivalence ratio. (τ_g : global residence time, D : inner tube diameter = 2 mm)

3.2 NOx 배기배출특성

Fig. 4는 예혼합 인자에 따른 질소 산화물의 농도와 체류시간에 따른 농도를 당량비 증가에 따라 나타내었다.

Fig. 4 (a)는 혼합거리(x/D)가 10일 때 연료분배율(σ)에 따른 질소산화물의 농도를 나타내고 있는데 전체적으로 당량비 증가에 따라 농도 또한 증가하고 있으며 연료분배율이 증가함에 따라 농도는 감소하고 있다. 이는 거시적 또는 국소적으로 농후해짐에 따라 연소불완전성이 증가하여 배기배출물의 수준 역시 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 4 (b)에서도 당량비(ϕ) 증가에 따라 혼합거리(x/D)의 감소에 따라 질소산화물의 농도는 줄어들고 있다. 그러나 Fig. 4 (a)와 비교하였을 때 정량적인 차이는 상대적으로 적었다. 즉 예혼합 정도가 혼합거리(x/D)보다는 연료분배율에 의해 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 앞서 Fig. 2의 화염거리에서도 비슷한 경향을 확인할 수 있었다.

Fig. 4 (c)와 (d)는 체류시간당 생성되는 질소산화물의 농도를 나타내고 있다. 신장률(strain rate)의 역수로서 체류시간은 물리적으로 연료의 입자가 버너출구에서 가시화염으로 나타나는 연소반응지역에 상응하는 체적을 통과하여 뜨거운 생성물의 화학양론적인 혼합기(a stoichiometric mixture of hot product) 상태가 되는데 필요한 시간을 의미한다.[18]

Fig. 4 (c)에서 당량비(ϕ) 2.38~4.46에서는 완전한 기울기를 가지다가 1.36~1.9에서는 가파른 기울기를 지니고 있다. 이는 체류시간의 감소로 인해 상대적으로 짧은 시간 안에 연소가 이루어지고 있음을 나타낸다.[1, 13]

또한 연료분배율(σ)이 50%, 75% 보다 100%일 때 생성율은 조금 증가하였는데 이는 혼합기가 완전히 예혼합되는 조건이므로 앞의 두 조건에 비하여 고정된 연료의 연소로 나오는 질소산화물에 비해 거시적 연소속도가 빨리 이루어지게 되어 상대적으로 생성율은 증가한 것으로 생각된다.

Fig. 4 (d)에서도 같은 경향을 나타내고 있으며

혼합거리는 질소산화물의 생성에 미치는 영향은 미미하였다.

이로서 혼합거리보다는 국소적인 혼합기의 농도가 질소산화물의 생성에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결 론

메탄과 공기를 사용한 이중 농축 부분 예혼합 화염을 대상으로, 예혼합 인자를 변화하였을 때 화염구조와 질소산화물 배기 배출에 미치는 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 화염길이는 당량비(ϕ)가 늘어날수록, 연료분배율(σ)과 혼합거리(x/D)는 줄어들수록 증가하였다.

(2) OH^* 와 CH^* 자발광의 높이에 따른 최고 강도점의 위치를 비교하여 화염두께를 알 수 있었고, 당량비(ϕ)가 증가할수록, 연료분배율(σ)과 혼합거리(x/D)는 감소할수록 줄어들었다.

(3) 질소산화물 배기배출 농도는 당량비(ϕ)가 증가할수록, 연료분배율(σ)과 혼합거리(x/D)가 줄어들수록 증가하였다. 그러나 혼합거리(x/D)에 의한 영향은 상대적으로 적었다.

(4) 화염구조변화와 질소산화물 배기배출에 미치는 예혼합 인자의 영향은 당량비(ϕ), 연료분배율(σ), 혼합거리(x/D) 순이었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Lyle, K. H., Tseng, L. K., Gore, J. P. and Laurendeau, N. M., 1999, "A Study of Pollutant Emission Characteristics of Partially Premixed Turbulent Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 116, pp. 627~639.
- [2] Kim, T. W., Alder, B. J., Laurendeau, N. M., Gore, J. P., 1995, "Exhaust and In-Situ Measurements of Nitric Oxide for Laminar Partially Premixed C_2H_6 -Air Flames: Effect of Premixing Level at Constant Fuel Flowrate," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 110-111, pp. 361~378.
- [3] Lee, T. W., Fenton, M. and Shankland, R., 1997, "Effects of Variable Partial Premixing on Turbulent Jet Flame Structure," *Comb. and Flame*, Vol. 109, pp. 536~548.
- [4] Lee, T. W., Mitrovic, M. and Wang, T., 2000, "Temperature, Velocity, and NO_x/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection," *Comb. and Flame*, Vol. 121, pp. 378~385.
- [5] Lockett, R. D., Boulanger, B., Harding, S. C. and Greenhalgh, D. A., 1999, "The Structure and Stability of the Laminar Counter-flow Partially Premixed Methane/Air Triple Flame," *Comb. and Flame*, Vol. 119, pp. 109~120.
- [6] Gore, J. P. and Zhan, N. J., 1996, " NO_x Emission and Major Species Concentrations on Partially Premixed Laminar Methane/Air Co-flow Jet Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 105, pp. 417~427.
- [7] Zhu, X. L., Nishioka, M. and Takeno, T., 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame," *Comb. and Flame*, Vol. 98, pp. 127~138.
- [8] Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., 1998, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Coflow Partially Premixed Flame," 27th Sym.(Int.) on Combustion, pp. 1369~1376.
- [9] Heitor, M. V. and Moreira, A. L. N., 1993, "Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 19, pp. 259~278.
- [10] Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," 23rd Sym.(Int.) on Combustion, pp. 281~288.
- [11] Røkke, N. A. and Hustad, J. E., Sonju, O. K., 1994, "A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 97, pp. 88~106.
- [12] Driscoll, J. F., Huh, H., Yoon, Y. B., and Donbar, J., 1996, "Measured Lengths of Supersonic Flame Lengths-and Analysis," *Comb. and Flame*, Vol. 107, pp. 176~186.
- [13] Driscoll, J. F., Chen, R. H. and Yoon, Y. B., 1992, "Nitric Oxide Levels of Turbulent Jet Diffusion Flames : Effects of Residence Time and Damkohler Number," *Comb. and Flame*, Vol. 88, pp. 37~49.
- [14] Paschereit, C. O., Gutmark, E. and Weisenstein, W., "CONTROL OF THERMOACOUSTIC INSTABILITIES AND EMISSIONS IN AN INDUSTRIAL-TYPE

GAS-TURBINE COMBUSTOR," 1998, 27th Sym.(Int.) on Combustion, pp. 1817~1824.

[15] Noton, T. S. and Smyth, K. C., 1991, "Laser-Induced Fluorescence of $\text{CH} \cdot$ in a Laminar CH_4/Air Diffusion Flame: Implications for Diagnostic Measurements and Analysis of Chemical Rates," *Combust. Sci. and Tech*, Vol. 76, pp. 1~12.

[16] Blevins, L. G., Renfrop, M. W., Lyle, K. H., Laerendreau, N. M., and Gore, J. P., 1999, "Experimental Study of Temperature and CH Radical Location in Partially Premixed CH_4/Air Coflow Flames," *Comb. and Flame*, Vol. 118, pp. 684~696.

[17] Kohse-Höinghaus, K., Heidenreich, R., Just, TH., 1984, "DETERMINATION OF ABSOLUTE OH AND CH CONCENTRATIONS IN A LOW PRESURE FLAME BY LASER-INDUCED SATURATED FLUORESCENCE," 20th Sym.(Int.) on Combustion, pp. 1177~1185.

[18] Turns, S. R., Myhr, F. H., 1991, "Oxides of Nitrogen Emissions From Turbulent Jet Flames: Part1-Fuel Effects and Flame Radiation," *Comb. and Flame*, Vol. 87, pp. 319~335.