

메탄/공기 층류 부분 예혼합화염에서 예혼합 정도에 따른 화염구조와 질소산화물의 배출에 미치는 영향에 관한 연구

오정석* · 정용기* · 전충환** · 장영준†

The Study of Effects of Variable Parameters on Flame Structure and NO_x Emission in Methane/Air Laminar Partially Premixed Flames

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

Key Words: NO_x Emission(질소산화물 배출), OH radical(OH 라디칼), Abel inversion(아벨 변환)

Abstract

It is shown that the effect of variable parameters on flame structures and NO_x emissions in the laminar partially premixed methane-air flames with a co-axial Bunsen burner. Objectives of this paper is to understand the effects of flow variables on NO_x emissions and the flame structure with OH chemiluminescence, including reconstructed image by abel inversion processing at each conditions. A fuel flowrate of 200 [cc/min] was fixed and the amount of air was varied from 400 to 1200 [cc/min]. The experimental variables were equivalence ratio(ϕ), fuel split percentage(σ) and inner tube recess(x/D). Flow conditions were ranged from 1.36~4.76(equivalence ratio), 50~100(fuel split percentage) and 0~20(inner tube recess). NO_x analyzer and ICCD camera with a OH filter were used as a main experimental apparatus. In addition, Abel inversion, which is a kind of tomography and valuable to estimate a two-dimensional structure of co-axial flames from cubical information, was employed for combustion diagnostics. Results from this study indicate that the main effects depend on equivalence ratio and next sigma, x/D for NO_x production and OH formation. Throughout Abel inversion, we could affirm the maximum position and the tendency of OH radical intensity by variants at five axial heights above the burner exit.

1. 서론

기호설명

- ϕ : 당량비 (equivalence ratio)
 σ : 연료혼합도 (fuel split percentage)
 x : 안쪽관이 후퇴하는 깊이 (mm)
 D : 안쪽관의 내경 (mm)
 x/D : 안쪽관 후퇴비 (inner tube recess)

연소시 발생하는 배기배출물 중의 하나인 NO_x는 오래전부터 연소현상에 대한 주된 연구대상 중의 하나였고 환경문제에 대한 관심이 증가하면서 그에 대한 중요성 또한 증가하고 있다. 이러한 연구의 연장선으로서 NO_x저감에 대한 많은 연구들이 수행되었으며 본 논문에서는 메탄/공기 층류 부분예혼합화염을 그 대상으로 하였다.

부분예혼합화염은 연료와 산화제를 연소이전에 미리 섞은 예혼합화염과 연료의 확산에 의해 연소하는 확산화염의 중간특성을 지니는 화염으로 예혼합화염보다 안정적인 화염을 얻을 수 있으면서, 확산화염 보다도 배기배출물이 적은 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾

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

* 부산대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

Lee^(1,2) 등은 난류부분예혼합화염을 구성하는데 있어 안쪽관에 공기로 희석을 시킨 경우로 안쪽관과 바깥쪽관의 상대속도비 증가는 화염길이를 증가시키고, 혼합길이의 증가는 화염길이에 미치는 영향은 미비하다고 보고하고 있다.

D.A. Greenhalgh⁽³⁾ 등은 당량비가 과잉인 예혼합화염과 희박한 예혼합화염을 분사한 부분예혼합, 대향류 화염에 있어 삼지화염에 관한 연구를 수행하였다. 그들의 결과에서 당량비와 신장률은 화염의 형상을 변화시키고, 화염소멸을 발생시킨다고 보고하고 있다.

Gore^(4,5) 등은 메탄-공기의 층류와 난류 부분예혼합화염 연구에서 당량비 증가에 따라 이중화염 구조가 생겼으며 가시화염의 길이가 증가하고 NOx의 발생량 또한 이에 비례하여 증가함을 보여줬다. 이는 화염의 신장율이 체류시간 및 복사열손실, 화염의 온도와 관련이 있음을 의미한다.

Nishioka⁽⁶⁾와 Takeno⁽⁷⁾ 등은 여러 조건의 메탄-공기 부분예혼합화염을 CHEMKIN을 사용하여 동축류와 대향류 버너에서 당량비에 따른 EINOx를 NOx 메카니즘 별로 구분하였다. 이의 결과로 당량비 1.5~3.0에서는 NOx의 발생량 또한 거의 로그 함수적으로 증가하였으며 thermal NOx 메카니즘의 영향이 지배적이라고 보고하고 있다.

실제로 많은 연소환경에서 초기 연료-공기 혼합상태, 공간적 변화들에 의해 부분예혼합화염 형태가 발생하고 있지만 어떤 파라미터가 화염형상, 안정성, 배기배출물에 영향을 주는지에 대한 연구가 진행중에 있다.

위에 언급된 연구들은 부분예혼합화염에 관한 연구들로서 연료흐름에 공기를 공급하는 일반적인 부분예혼합화염에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 공기를 공급하여 혼합을 강화시키는 것이 아닌 연료를 공급하여 부분적으로 과농한 혼합기를 생성하는 화염을 대상으로 첫 번째 각 혼합 파라미터가 부분예혼합 화염에 있어 당량비(ϕ)와 연료혼합정도(σ), 혼합길이(x/D)에 따른 OH 자발광을 통해 화염형상을 파악하고, 보다 자세한 정보를 획득하기 위해 Abel 변환을 통하여 이차원 OH 정보를 획득하였다. 두 번째 동일한 조건에서 부분예혼합과 관련한 여러 파라미터에 따른 NO 특성을 파악하였다.

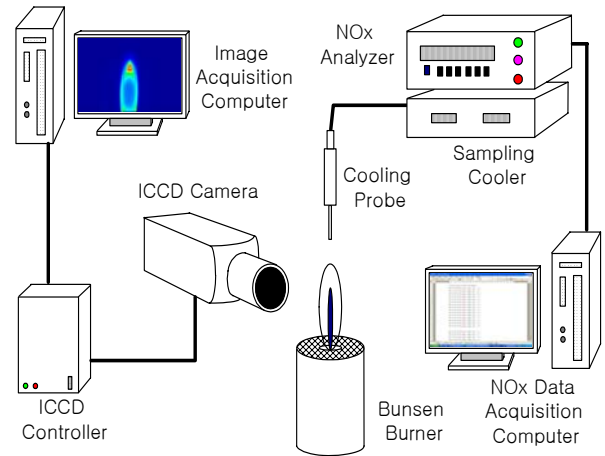


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

2. 실험적 연구

2.1 실험장치 및 방법

본 연구는 메탄 층류 부분예혼합 화염을 대상으로 각종 파라미터가 화염구조와 배기배출물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 본 실험에 사용한 연소기는 연료와 공기를 각 조건에 맞춰 공급하기 위하여 직경 2mm인 내부관과 8mm인 바깥관을 동축으로 설치하였다. 외부에는 화염의 안정화를 위해 일정한 유량의 공기를 공급하였다.

화염구조를 파악하기 위해 ICCD(PI MAX, Princeton Instrument) 카메라를 사용하였으며, OH 화상을 획득하기 위하여 간섭필터(304±3nm)를 장착하였다. 각 조건에서 100개의 화상을 취득하여 평균하여 나타내었다.

동일한 조건에서 OH 화상과 동시에 NOx 배출 특성을 파악하였다. NOx를 획득하기 위한 프로브는 흡입출구의 직경이 2mm로 제작하였으며, 빠른 랜칭을 위해 냉각수를 공급하였다.⁽⁸⁾ 일반적으로 측정위치는 가시화염 높이의 두 배 이상이면 화염에 직접적으로 영향을 주지 않고 일정한 NOx를 취득할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 프로브는 노즐 팁에서 12cm 떨어진 곳에서 NOx를 취득하였다.

화염구조를 좀 더 자세히 파악하기 위해 ICCD로부터 획득한 경로 적분된 이미지값을 통하여 Abel 변환을 통하여 각 화염이미지의 단면정보를 획득하였다. Abel 변환은 관측선상에서 경로적분된 값을 공간적으로 분해하여 국소값을 획득하는 방법이다.⁽¹⁰⁾

Table 1 Parameters and Experimental conditions

parameter	range
ϕ	1.36, 1.59, 1.90, 2.38, 3.17, 4.76
σ (%)	50, 75, 100
x/D	0, 10, 20

$Q_{\text{fuel}} = 200$ [cc/min]
 $Q_{\text{pri.air}} = 400 \sim 1200$ [cc/min]
 $Q_{\text{sec.air}} = 55$ [slpm]

아벨변환에서 사용된 수식을 나타내면 다음과 같다. P(y)는 경로 적분된 측정값이고, 화염 내부 분포 물리량은 반지름 r의 함수 F(r)로 나타낼 수 있다.

$$P(y) = 2 \int_0^\infty F[(r^2 + y^2)^{1/2}] dy = 2 \int_y^\infty \frac{r' F(r')}{(r'^2 - r^2)^{1/2}} dr'$$

$$F(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{P(r')}{(r'^2 - r^2)^{1/2}} dr'$$

$$r'^2 = r^2 + y^2$$

2.2 실험조건

연료는 순도 99.9%의 메탄을 200[cc/min]을 일정하게 공급하였으며, 산화제로는 공기를 사용하였다. 화염에 예혼합 정도를 정의하기 위해 각 당량비 조건마다 Table1과 같은 세 가지 인자를 사용하였다. 부분예혼합 정도(fuel split percentage, σ)는 100, 75, 50%의 세 조건으로 설정하였다.

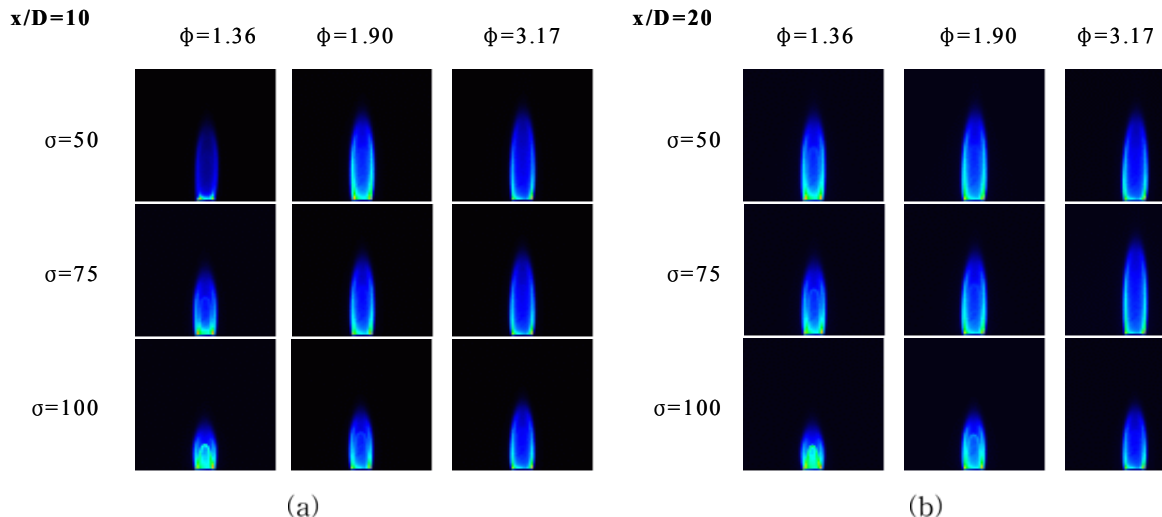


Fig. 2 Photographs of OII radical chemiluminescence intensity at variable flow conditions

여기에서 $\sigma=100\%$ 라는 것은 완전히 연료가 예혼합된 경우를 의미하고, $\sigma=50\%$ 라는 것은 연료 50%는 예혼합되고 50%는 따로 공급되는 것을 의미한다. 예혼합되는 길이(x/D)는 안쪽관이 후퇴하는 길이를 나타낸 것으로 x/D의 증가는 혼합특성을 강화시키는 것을 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 OH 라디칼 화상 취득

Fig. 2는 일정한 당량비에서 부분예혼합정도(σ)와 혼합길이(x/D)에 따른 혼합특성을 파악하기 위해 OH 자발광 이미지를 획득한 것이다.

당량비가 1.36이고, 안쪽관 후퇴비(x/D)가 10인 경우 연료혼합도(σ)가 증가할수록 화염길이는 감소하고, 일반적인 예혼합화염 형태인 이중구조의 화염형태를 유지하고 있다. $\sigma=50$ 인 경우에는 안쪽관으로 연료가 100[cc/min]이 들어감에 따라 안쪽관과 바깥쪽관과의 상대 속도차로 인해 화염길이 증가하고, OH 반응영역이 후류로 이동하면서 전체적인 반응영역이 증가하였다. 이는 안쪽관에서 나온 과잉연료가 연소하는데 요구되어지는 체류시간이 길어지기 때문으로 사료된다.

한가지 흥미로운 것은 당량비 1.36과는 다르게 당량비가 3.17로 증가할수록 σ 에 의한 이중구조의 화염은 발견되지 않으며, 화염길이 측면에서 약간의 감소하는 경향을 보여준다. 이는 초기에 과농한 혼합기가 공급되므로 인해 σ 변화에 의한 것보다 당량비에 영향이 지대한 것으로 판단된

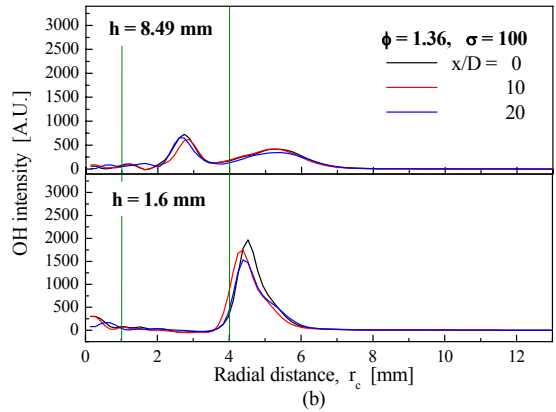
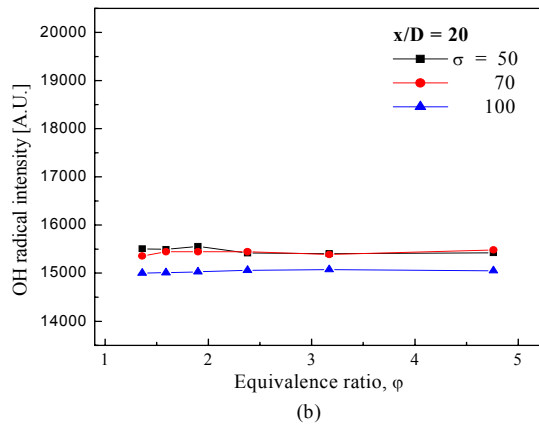
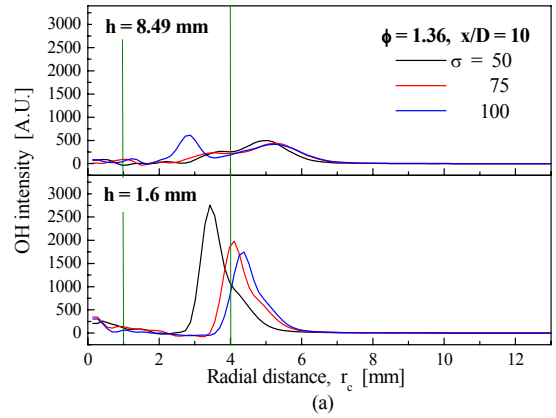
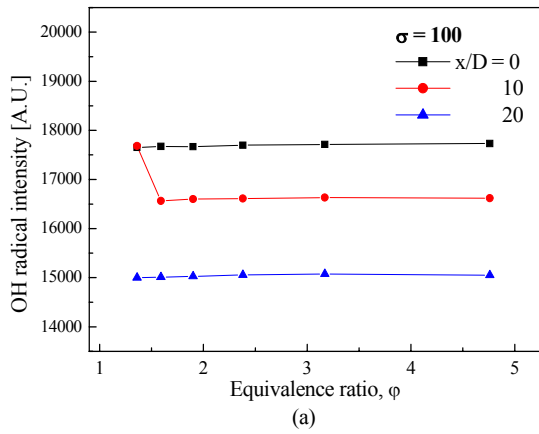


Fig. 3 Average intensity of OH radical at plotted as a function of ϕ

Fig. 4 OH radical intensity profile as a result of Abel inversion plotted by radial distance

다.

Fig. 3은 각 파라미터가 혼합특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 OH 자발광의 평균 강도를 나타낸 것이다. 초기에 연료-공기혼합상태를 가변한 경우 부분예혼합을 한 상태($\sigma=50$)에서는 완전히 혼합한 상태와 비교하여 상대적으로 자발광 강도값이 약 500정도가 상승하였다. 반면에 x/D 에 변화에 의한 OH 자발광 강도는 x/D 가 20인 경우에 비해 x/D 가 0인 경우가 약 17600 정도로 15000에 비해 약 2600정도의 많은 OH자발광 강도의 하락값을 보여주었다.

$\sigma=100$ 인 경우와 $x/D=20$ 인 경우가 다른 조건에 비해 OH 자발광 강도가 낮게 나타났다. OH 라디칼은 온도 의존성이 크고⁽¹²⁾ 본 실험조건에서 NOx는 온도에 크게 의존하므로⁽⁶⁾ NOx가 저감되는 결과를 예상할 수 있다.

3.3 OH 라디칼 자발광 화염의 단면정보

화염이미지에 대한 보다 자세한 정보를 확인하기 위하여 각 조건에서 OH 라디칼을 Abel 변환을 통하여 단면정보를 확인하였다. Abel 변환을 통한 국소 OH 강도는 국소 농도에 비례하고, 이중화염 구조의 존재를 확인할 수 있다.

Fig. 4 (a)는 $x/D=10$, $\phi=1.36$ 인 일정한 조건에서 σ 에 따른 영향을 축방향으로 2지점에 대하여 나타낸 것이다. 노즐 출구에서 1.6mm인 지점에서 완전 혼합된 경우인 $\sigma=100$ 보다 상대적으로 덜 혼합된 $\sigma=50$ 의 경우가 OH 강도가 높게 나타났으며 안쪽관의 속도 증가로 인해 외부의 유동의 유입으로 인해 최고점의 위치가 노즐중심으로 이동한다. 즉 동일한 당량비에서 초기혼합상태 σ 의 증가에 따라 OH강도는 감소하는 것으로 나타났다. 축방향으로 노즐에서 8.49mm 높이에서 전

체적으로 화염의 이중구조를 확인할 수 있었다. 하지만 완전 혼합인 $\sigma=100\%$ 인 경우가 화염이 이중구조를 뚜렷히 보여주고 있으며 안쪽 최고치가 바깥쪽 최고치보다 높게 나타나는 특징을 보여준다.

Fig. 4 (b)는 $\phi=1.36$, $\sigma=100\%$ 인 조건에서 혼합길이(x/D)에 따른 영향을 나타낸 것이다.

x/D 가 0에서 20으로 증가시킨다는 것은 혼합할 수 있는 길이를 증가시킨다는 것이므로 예혼합 정도를 높인다는 의미이다. 앞의 결과에서 예상할 수 있듯이 노즐로부터 1.6mm 떨어진 지점에서 x/D 의 변화는 상대적으로 σ 의 변화에 비해 OH 라디칼의 차이가 미미하게 나타났다. 축방향으로 8.49mm 떨어진 지점에서는 이론당량비에 특징인 이중화염구조를 보여주고 있다.

결론적으로 연료혼합특성을 변화시키는 여러 인자 중 일정한 당량비에서 σ 의 영향이 가장 크고, 상대적으로 x/D 의 영향은 적은 것으로 나타났다.

3.4 NOx 배출특성

Fig. 5는 예혼합 인자의 영향에 따른 NOx 배출농도를 보여주고 있다. 인자 각각의 영향을 나타내기 위하여 다른 인자들은 고정시켰으며 제일 위 그림부터 연료혼합도(σ) 그리고 직경비(x/D)에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸다.

당량비가 증가할수록 NOx의 측정값은 증가하였다. 이것은 여러 참고논문^(1~7)의 결과와 유사하였다.

그리고 연료의 혼합도(σ)가 증가할수록 NOx 생성은 줄었는데 이는 연료가 바깥쪽관으로 더 들어감에 따라 혼합기가 잘 섞이는 비율이 많아지고 안쪽관에서의 국소 당량비는 줄어들기 때문으로 생각된다.

안쪽관의 후퇴비(x/D)의 영향은 그 값이 증가할수록 NOx 생성은 줄어들었다. 이는 안쪽관이 아래로 내려감에 따라 혼합기가 잘 섞이기 때문⁽¹⁾으로 생각된다.

4. 결 론

메탄-공기를 사용한 이중동축 층류 부분예혼합 실험을 통하여 OH 라디칼 영상취득, Abel 변환, NOx 측정을 하였고 이를 통하여 다음과 같은 결

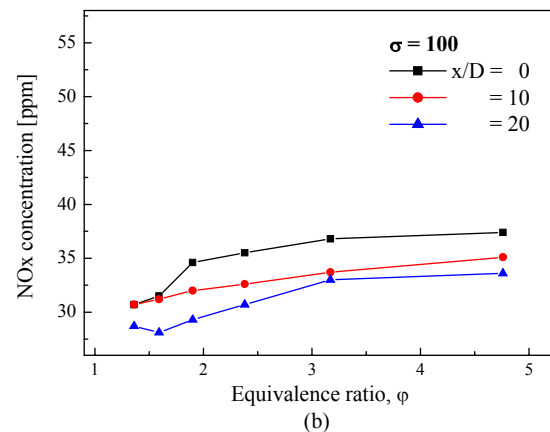
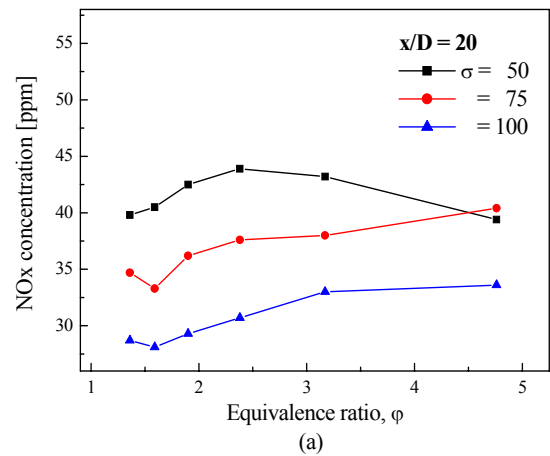


Fig. 5 Effects of parameters: NOx emission concentration plotted against the level of partial premixing.

론을 얻을 수 있었다.

(1) OH 라디칼의 화상을 통해서 당량비 증가에 따라 화염의 길이는 증가하였으나 연료의 혼합도에 따른 증가는 둔화되었다. 그러나 당량비 감소에 따라 버너출구에서의 강도는 커짐을 확인할 수 있었다.

(2) Abel 변환을 통해서 OH 라디칼의 강도는 화염후류에서 공통적으로 크게 나왔으며 σ , x/D 가 작을수록 최고 강도값은 증가하였다. 또한 높이 증가에 따라 이중화염 구조를 확인할 수 있었다.

(3) NOx 측정값에 있어서 당량비 증가에 따라 증가하였으며 그리고 σ , x/D 값이 작을수록 NOx 생성은 증가하였으나 x/D 의 영향은 크지 않았다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Dasch, C. J., 1992, "One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods," *Applied Optics*, Vol. 31, No.8
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Noton, T. S. and Smyth, K. C., 1991, "Laser-Induced Fluorescence of CH in a Laminar CH₄/Air Diffusion Flame: Implications for Diagnostic Measurements and Analysis of Chemical Rates," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 76, pp. 1~12.