

〈 논문 〉

CH₄/Air 예혼합화염의 하류영역에서 체류시간 및 열손실에 의한 NO_x의 생성특성

황철홍* · 현승호** · 탁영조*** · 이창언†

(2006년 9월 27일 접수, 2006년 10월 27일 심사완료)

The Effect of Residence Time and Heat Loss on NO_x Formation Characteristics in the Downstream Region of CH₄/Air Premixed Flame

Cheol-Hong Hwang, Sung-Ho Hyun, Young-Jo Tak and Chang-Eon Lee

Key Words : NO_x(질소산화물), Premixed Flame(예혼합화염), Post-flame Region(화염 하류영역), Residence Time(체류시간), Heat Loss(열손실)

Abstract

In this study, the NO_x formation characteristics of one-dimensional CH₄/Air premixed flame using detailed-kinetic chemistry are examined numerically. The combustor length and the amount of heat loss are varied to investigate the effect of residence time and heat loss on the NO_x formation in a post-flame region. In the flame region, NO is mainly produced by the Prompt NO mechanism including N₂O-intermediate NO mechanism over all equivalence ratios. However, thermal NO mechanism is more important than Prompt NO mechanism in the post-flame region. In the case of adiabatic condition, the increase of combustor length causes the remarkable increase of NO emission at the exit due to the increase of residence time. On the other hand, NO reaches the equilibrium state in the vicinity of flame region, considering radiation and conduction heat losses. Furthermore the NO, in the case of $\phi=1.2$, is gradually reduced in the downstream region as the heat loss is increased. From these results, it can be concluded that the controls of residence time and heat loss in a combustor should be recognized as an important NO_x reduction technology.

1. 서론

일반적으로 예혼합화염은 화염길이가 짧고 당량비의 조절을 통한 낮은 화염온도로 인하여 NO_x 배출지수를 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 활용하기 위해 최근 가스터빈을 비롯한 대부분의 실용 연소기에서 예혼합 연소방식

의 적용이 시도되고 있다. 이와 같은 예혼합 방식의 연소기에 대한 연구로서 현단계에는 실용적 측면으로 연료/공기의 혼합제어기술 등을 이용한 화염안정화 연구에 주로 초점이 맞추어졌다. 예혼합 연소기에서의 NO_x 저감법에 대해서는 혼합비, 혹은 선회기를 이용한 난류강도의 변화 등의 비교적 간단한 실험적 연구⁽¹⁾가 진행되었으나, NO_x 발생에 관한 체계적인 연구는 많지 않다. 그러나 최근에 NO_x 등을 포함한 오염물질의 환경규제 더욱 강화되고 있어 예혼합 연소에서도 NO_x를 더욱 저감하기 위한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

NO_x 생성특성에 관한 연구들을 살펴보면, 대부분 비예혼합화염을 대상으로 수행되고 있다. 특히 화염온도, 화염면의 신장, 체류시간, 난류강도, 주요 라디칼의 농도 및 다차원 효과 등이 NO_x 생성

* 회원, 인하대학교 산업과학기술연구소

** 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 인하공업전문대학 자동차과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7323 FAX : (032)868-1716

에 미치는 주요 인자로서 구체적으로 검토되고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 예혼합화염에서 NOx에 관한 대표적인 연구로는 Correa 등⁽⁶⁾이 넓은 범위의 압력(1~10atm)과 당량비(0.6~1.0)의 조건에서 NOx 생성특성을 검토한 바 있으며, Drake 등⁽⁷⁾이 고압조건에서 NO 생성원인을 검토한 바 있다. 이들 연구들은 NOx 생성기구의 분리법을 통해 화염구조와 NOx의 생성원인에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으나, 약 1.0cm 이내의 화염대에 국한하여 수행되었다. 그러나 실용 연소기의 경우, 화염대에서 생성된 NOx는 연소기 출구에 도달하는 동안에 체류시간 및 열손실 등에 따른 반응경로의 변화로 추가적인 NOx 생성 및 소멸반응을 경험하게 될 것으로 예상된다. 특히 NO 배출지수가 연소기 출구의 값을 감안할 때 화염대를 포함한 화염 하류영역에서의 NOx 생성특성 규명은 실용 연소기 및 연소시스템 설계에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 1차원 CH₄/Air 화염을 대상으로 0.6~1.4의 당량비 범위에 대하여 화염대에서의 NOx 생성특성을 먼저 검토하고, 이 결과들이 화염 하류영역에서 어떠한 경로를 통해 NOx의 최종 배출을 유도하는지 검토하고자 한다. 또한 벽면의 단열조건을 통해 체류시간이 NOx 생성에 미치는 영향을 검토하고, 복사 및 열전도에 의한 열손실이 실제 NOx 배출지수에 어떠한 영향을 주는지 규명하고자 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 화염대 및 화염 하류영역에서의 NOx 생성특성을 검토하기 위하여 1차원 자유전파 예혼합화염을 대상으로 하였으며, 지배방정식으로 연속, 화학종, 에너지 및 상태 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\dot{M} = \rho u A \quad (1)$$

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} = -\frac{d}{dx}(\rho A Y_k V_k) + A \dot{\omega}_k W_k \quad (2)$$

(k = 1, 2, 3, ..., K)

$$\begin{aligned} \dot{M} \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left(\lambda A \frac{dT}{dx} \right) + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K \rho c_{p,k} Y_k V_k \frac{dT}{dx} \\ + \frac{A}{c_p} \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k W_k - \frac{A}{c_p} \dot{q}_{rad} - \frac{A}{c_p} \dot{q}_{cond} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{p \bar{W}}{RT} \quad (4)$$

여기서 x 는 공간좌표, \dot{M} 는 질량유량, A 는 단면적, T 는 온도, p 는 압력, u 는 혼합물의 속도, ρ 는 밀도, $Y_k, W_k, c_{p,k}, \dot{\omega}_k, h_k$ 들은 각각 k 번째 화학종의 질량분율, 분자량, 정압비열, 단위 체적당 물생성율, 비엔탈피이다. V_k 는 k 번째 화학종의 확산속도로서 열확산을 고려한 Fickian 관계를 이용하여 구해진다. 그 외에 \bar{W} 는 혼합물의 평균 분자량, R 은 가스상수, λ 는 혼합물의 열전도계수, c_p 는 혼합물의 정압비열, \dot{q}_{rad} 와 \dot{q}_{cond} 는 복사 및 전도 열손실을 의미한다.

계산에 이용된 경계조건은 식 (5)~(6)과 같다.

$$\begin{aligned} x = -\infty \text{ (미연가스 상류 측);} \\ T(-\infty) = T_u, \quad Y_k(-\infty) = Y_{k,u} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x = +\infty \text{ (기연가스 하류 측);} \\ \frac{dT}{dx}(+\infty) = 0, \quad \frac{dY_k}{dx}(+\infty) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 복사 및 전도 열손실

복사 열손실 효과를 반영하기 위하여 Optically thin model⁽⁸⁾을 이용하였으며, 열손실에 주로 기여하는 것으로 알려진 CO₂, H₂O, CO, CH₄의 4가지 화학종을 고려하였다. 단위 체적당 복사 열손실은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$\dot{q}_{rad} = -4\sigma K_p (T^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K_p = P_{CO_2} K_{CO_2} + P_{H_2O} K_{H_2O} + P_{CO} K_{CO} \\ + P_{CH_4} K_{CH_4} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수, T 와 T_∞ 는 각각 국부 온도와 주위 온도를 나타내며, K_p 는 혼합가스의 플랑크 평균 흡수계수를 나타낸다. 또한 P_k 와 K_k 는 화학종 k 의 분압과 각 가스의 흡수계수를 나타내며, 흡수계수는 다음의 근사식으로 계산하였다.

$$K_k = \sum_{j=0}^4 A_{kj} T^j \quad (k = \text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{CH}_4) \quad (9)$$

여기서 A_{kj} 는 온도에 따른 각 화학종의 다항식계수로써 Ju 등⁽⁹⁾에 의해 사용된 값을 적용하였다.

단위 면적당 전도 열손실을 고려하기 위하여 식 (10)과 같은 정상상태 전도 열전달방정식을 에너지 방정식에 추가하였다.

$$\dot{q}_{cond} = -\frac{\kappa}{\delta}(T - T_{\infty}) \quad (10)$$

위 식에서 κ 는 고체 재질에 의해 결정되는 열전도 계수이며, δ 는 유체와 접촉되는 면의 두께를 의미한다. 실제 연소로에서 전도 열전달은 연소로의 재질, 두께 및 접촉되는 유체의 성분에 의해 크게 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 이들에 대한 영향을 종합적으로 고려할 수 있도록 식 (11)과 같은 단위 면적당 전도 열저항(R)을 도입하였으며, 이의 변화를 통해 전도 열손실에 의한 영향을 검토하였다. 즉 R 이 작을수록 상대적으로 많은 양의 열에너지가 전도에 의해 손실될 수 있음을 의미한다.

$$\dot{q}_{cond} = -\frac{1}{R}(T - T_{\infty}) \quad (R = \delta / \kappa) \quad (11)$$

2.3 계산방법

본 연구에서는 Premix code⁽¹⁰⁾를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II⁽¹¹⁾와 Transport package⁽¹²⁾를 사용하였다. 계산은 CH₄/Air 화염을 대상으로 하였으며, 당량비(ϕ)는 0.6~1.4의 범위에서 수행되었다. 입구 온도와 압력은 각각 298.15K과 1atm으로 하였다. 화염 하류의 NO_x 특성을 검토하기 위하여 계산영역은 최소 10cm에서 최대 400cm까지 고려하였다.

연료 및 NO_x에 대한 상세 반응기구는 GRI 3.0⁽¹³⁾을 이용하였다. 이 반응기구는 CH₄의 산화반응에 대해 C₂ 반응까지 포함하며, Thermal NO, Prompt NO, N₂O-경유(Intermediate) NO 및 NO₂ 생성기구 등 NO_x의 전 반응경로를 상세하게 묘사하고 있다. 본 연구에서는 Zeldovich 반응에 의해 발생되는 Thermal NO의 역할을 분리하기 위해 Nishio-ka 등⁽¹⁴⁾이 제안한 방법에 의해 동일 화염을 두 번 계산하였다. 즉, GRI 3.0을 이용하여 NO의 총 발생량(이하, Total NO)을 구하고, 다음에 C₂ 반응에 Thermal NO 반응만을 포함한 반응기구를 이용하여 NO 발생량을 구하였다. 실제 Total NO와 Thermal NO의 차이는 Prompt NO 반응기구와 N₂O-경유 NO 반응기구 등에 의해 발생되는 값으로서 본 연구에서는 편의상 Prompt NO로 표기하였다.

각 화염에서 NO 생성량을 정량적으로 비교하기 위하여, Takeno 등⁽¹⁵⁾이 제안한 NO 배출지수(Emission index)를 이용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$EI_{NO} = \frac{\int_0^L W_{NO} \dot{\omega}_{NO} dx}{-\int_0^L W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} dx} \quad (12)$$

3. 결과 및 검토

3.1 단일조건에서의 NO_x 생성특성

화염 하류영역에서 NO_x 생성특성을 검토하기 이전에 화염면 근처의 화염구조 및 NO_x 생성을 확인하기 위하여, Fig. 1은 $\phi=0.6, 1.0$ 및 1.2 에 대한 온도, 주요 화학종 및 NO, N₂O, NO₂를 도시한 것이다. NO_x 농도들은 동일한 좌표를 사용하기 위하여 특정 배수를 곱하여 표현되었다. 계산은 버너 출구로부터 약 10cm 하류 영역까지 수행하였으나, 화염면 근처를 상세히 관찰하기 위해 그림은 $x=0.3$ cm까지만 도시하였다. 우선 화염구조를

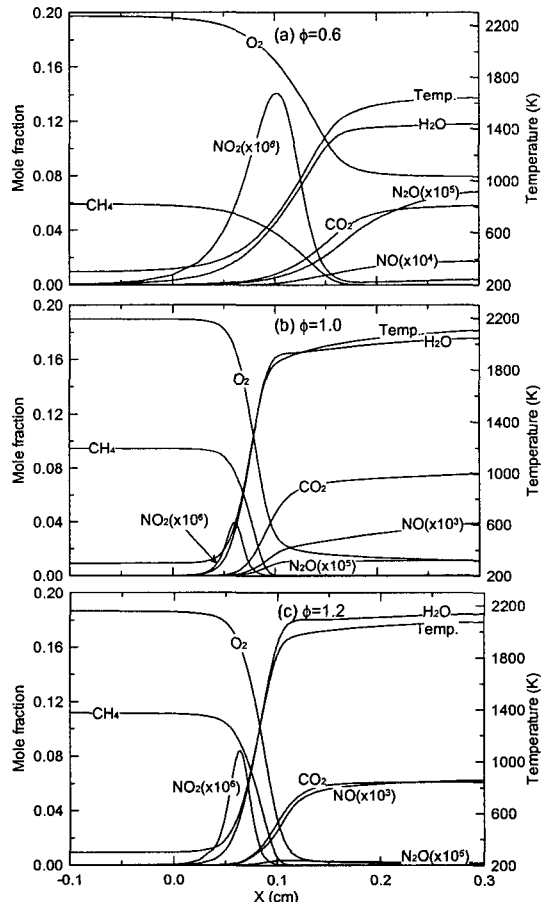


Fig. 1 The profiles of mole fraction and temperature for laminar, CH₄-air premixed flame; (a) $\phi=0.6$, (b) $\phi=1.0$, (c) $\phi=1.2$

살펴보면, 당량비가 0.6에서 1.0으로 증가하면 하류방향 길이에 따른 화염온도의 증가, CH₄ 및 O₂의 감소, 생성물의 증가 구배가 매우 크나, $\phi=1.0$ 에서 1.2로 변화하면 이 구배들은 미소하게 작아짐을 볼 수 있다. 식 (13)을 이용하여 계산된 층류 화염면의 두께는 $\phi=0.6, 1.0$ 및 1.2에 대해 각각 약 1.0, 0.45 및 0.48mm로 희박한 조건에서 이론 당량비로 변화될 때 급격히 감소되다가 $\phi=1.1$ 근처에서 최소(0.44mm)를 이루며, 과농한 영역에서 다시 증가하게 된다.

$$\delta_L = \frac{T_{\text{product}} - T_{\text{reactant}}}{\max(|dT/dx|)} \quad (13)$$

다음으로 NOx 농도들을 살펴보면, NO 농도는 모든 조건에서 화염대에서 급격히 증가하다가 생성물의 온도가 거의 균일하게 되는 하류 위치에서 증가 구배가 크게 감소됨을 알 수 있다. 특이한 점으로 $\phi=1.0$ 과 1.2의 경우를 비교해보면, $x=0.3$ cm 초기 단면까지는 $\phi=1.2$ 인 연료 과농의 경우가 NO 증가율이 크며 NO 몰분율도 높게되는 것을 알 수 있다. NO₂ 농도는 모든 조건에서 온도변화가 발생하는 시점에서부터 증가하여 온도가 약 600K~800K에서 최고점에 도달함을 볼 수 있다. 일반적으로 NO₂는 화염면의 위치로 인용되는 OH 또는 CH 라디칼의 최고점보다 훨씬 상류에서부터 발생되는데, 이는 화염대로부터 확산된 NO와 HO₂ 사이의 반응에 의해 이루어짐을 Correa 등⁽⁶⁾의 민감도 해석에 의해 지적된 바 있다. 그리고 N₂O 경우는 이미 잘 알려진 바와 같이 $\phi < 0.8$ 의 희박한 조건과 낮은 온도영역에서 N₂O/NO의 비율이 크게 증가된다고 알려져 있다. 본 연구에서도 $\phi=0.6$ 의 경우에는 N₂O/NO의 비율이 1/10보다 크지만, $\phi=1.0$ 과 1.2의 경우에는 그 비율이 약 1/100보다 작음을 확인할 수 있다. 이와 같이 생성된 N₂O는 결과적으로 NO로 변화되기 때문에 N₂O-경유 NO 반응기구는 희박한 예혼합 연소에서 NO 제어전략으로 중요시 되며, 현재 가스터빈을 대상으로 많은 연구들이 수행되고 있다.⁽¹⁶⁾

Fig. 2는 Total NO와 Thermal NO에 대한 몰분율(χ_{NO})과 몰생성율($\dot{\omega}_{NO}$)을 $x=0.5$ cm 단면까지 도시한 것이다. $\phi=0.6$ 의 경우에, 전체 NO 발생량 중 Thermal NO는 매우 작은 비중을 차지하는 반면, Total NO와 Thermal NO의 차에 해당되는 Prompt NO가 대부분의 NO 생성에 기여하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 N₂O-경유 NO 기구

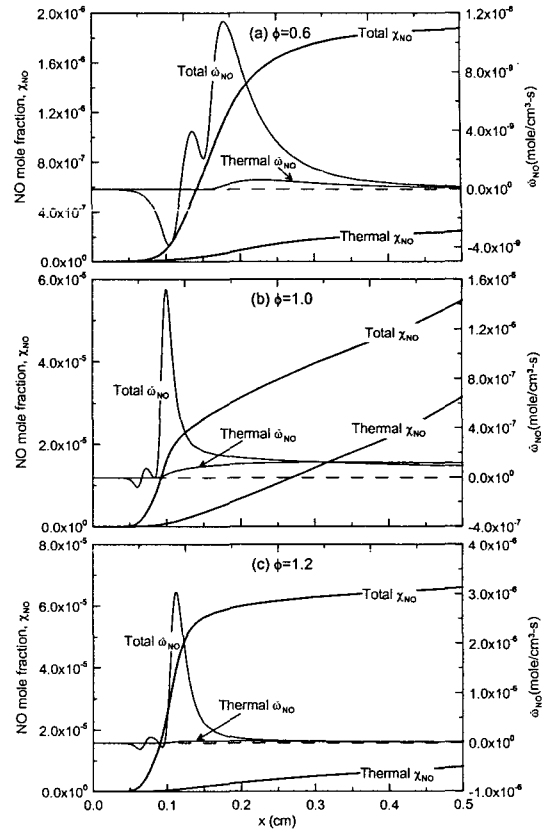


Fig. 2 Mole fraction and molar production rate of NO via the different NO formation routines

를 Prompt NO 기구에 포함하여 고려하였지만, 반응경로 및 상세반응속도 해석을 통해 $\phi=0.6$ 에서는 주로 N₂O-경유 기구에 의해 NO가 발생됨을 확인하였다. $\phi=1.0$ 의 경우에는 화염면 근처의 NO 생성은 주로 Prompt NO에 의해 발생되지만, 하류방향으로 이동하면서 Prompt NO에 의한 생성 (Total 생성율과 Thermal 생성율과의 차)이 급격히 감소하여 NO의 증가는 대부분 Thermal NO에 의해 이루어진다. 또한 $x=0.3$ cm 근방에서부터 Thermal χ_{NO} 가 Total χ_{NO} 보다 더 급격히 증가함을 알 수 있으며, 이보다 더 하류에서는 NO 농도의 증가는 Thermal NO에 의해 증가함을 확인할 수 있었다. 마지막으로 $\phi=1.2$ 의 경우에 NO 농도는 화염대 근방에서 주로 Prompt NO에 생성되며 하류 방향으로 이동하여도 NO 농도의 증가는 미소함을 알 수 있다. 이 하류단면에서의 NO 농도의 증가는 Thermal 몰분율에서 알 수 있듯이 주로 Thermal NO에 기인함을 알 수 있다. 이들에 대한 원인은 $\dot{\omega}_{NO}$ 을 통해서도 확인할 수 있는데, $\phi=0.6$ 은 Prompt 기구에 의한 $\dot{\omega}_{NO}$ 가 상대적으로 하류방향

으로 넓게 분포되어 있어 다른 조건에 비해 하류에서도 N₂O-경유 NO가 포함된 Prompt NO의 발생이 중요시될 수 있음을 짐작할 수 있다. 반면에 $\phi=1.0$ 에서는 $x=0.3\text{cm}$ 근처에서 Thermal $\dot{\omega}_{NO}$ 가 Total $\dot{\omega}_{NO}$ 보다 커지는 현상이 발생되는데, 이는 이 위치 이후부터 Prompt NO가 소멸에 기여함을 의미한다. 마지막으로 $\phi=1.2$ 에서는 하류로 갈수록 Total 및 Thermal $\dot{\omega}_{NO}$ 모두 0에 가까운 값을 갖기 때문에 χ_{NO} 가 미소하게 증가되지만, χ_{NO} 의 분포를 통해 확인했듯이 하류로 갈수록 주로 미소한 Thermal $\dot{\omega}_{NO}$ 에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 당량비 변화에 따른 각종 NO 반응기구의 특성을 확인하기 위하여, $x=10\text{cm}$ 단면의 EI_{NO}들과 화염온도를 도시한 것이다. 그림에서 $0.6 < \phi < 0.8$ 범위의 EI_{NO}는 5배수하여 도시하였다. $\phi=0.6$ 일 때 Thermal EI_{NO}는 거의 0에 가까워 NO는 대부분 N₂O-경유를 포함하는 Prompt NO 반응기구에 의해 생성되고 있음을 알 수 있다. 이 Prompt NO는 당량비가 증가할수록 그 영향력이 감소하여 $\phi=0.8$ 에서는 Total EI_{NO}와 Thermal EI_{NO}가 같아져 NO는 Thermal NO 반응기구에 의해 생성되고 있음을 알 수 있다. 그리고 $0.8 < \phi < 1.1$ 의 범위에서 Prompt NO는 오히려 NO의 소멸에 기여하며 $\phi=1.0$ 근처에서 가장 큰 소멸효과를 보여주고 있다. 반면 $\phi=1.1$ 이상에서는 다시 Prompt NO가 NO 생성에 기여하기 시작하며, $\phi=1.3$ 이상에서는 대부분 Prompt NO에 의해 생성되고 있음을 알 수 있다. 단 이 결과들은 $x=10\text{cm}$ 단면에서의

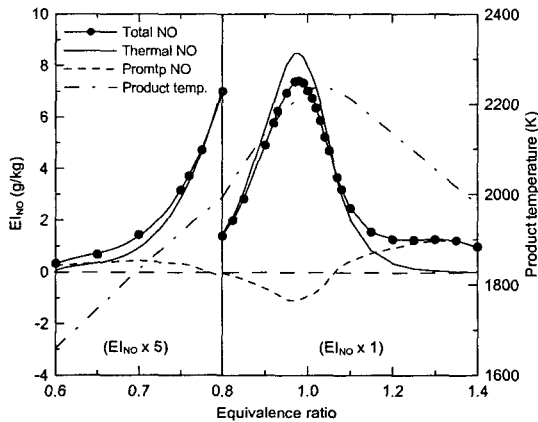


Fig. 3 Product temperature and EI_{NO} via the different NO formation routines with equivalence ratio at the exit ($x=10\text{cm}$, EI_{NO} in the range of $0.6 < \phi < 0.8$ is amplified by five times)

결과로 연소가스의 체류시간이 비교적 작은 값에 해당된다. 또한 Fig. 2에서 확인한 바와 같이 $\dot{\omega}_{NO}$ 가 화염대 이후에서 급격히 감소되기는 하나 0보다 큰 값을 계속 유지하고 있기 때문에, 체류시간이 증가할수록 Thermal NO에 의해 NO는 계속 증가하리라 예상된다. 따라서 충분히 긴 계산영역에서 체류시간에 따른 EI_{NO}를 확인하는 것은 대형 연소기 설계와 관련된 실용적인 측면에서 매우 중요하다 할 수 있다.

Fig. 4는 각 당량비에서 연소기 길이를 400cm까지 증가시킨 경우 축방향 길이에 따른 NO 몰분율의 변화를 도시한 것이다. 우선 $\phi=0.6$ 과 1.2 경우의 NO 몰분율을 보면 약 $x=0.3\text{cm}$ 이후에서 점점 증가율이 둔화되면서 NO 농도가 일정한 값에 수렴하게 된다. 이 경우에도 $x=400\text{cm}$ 단면에서의 NO 농도는 $x=1.0\text{cm}$ 단면과 비교해 보면 $\phi=0.6$ 의 경우는 약 50배, $\phi=1.2$ 의 경우는 15배로 많아짐을 알 수 있다. 다음으로 Thermal NO의 효과가 가장 큰 $\phi=1.0$ 의 경우에는 $x=100\text{cm}$ 단면까지 계속적으로 상승한 후에 수렴하게 되며, NO 농도는 $x=1.0\text{cm}$ 과 400cm 단면을 비교해 보면 약 200배 정도 증가하게 된다. 또 하나 특이한 점은 당량비가 낮은 $\phi=0.6$ 의 경우는 다른 조건들에 비해 하류에서도 계속적으로 NO가 증가하며, $x=400\text{cm}$ 에서도 평형상태에 도달하지 못함을 확인할 수 있다. 반면에 $\phi=1.0$ 과 1.2의 경우에는 $x=200\text{cm}$ 이후에는 추가적으로 NO가 생성되지 않음을 확인할 수 있다. 즉 이러한 결과는 예혼합 연소기에서 NO_x 배출을 저감하기 위해서는 연소기 설계 시에 당량비와 연소실 길이의 상관관계에 대한 검토가 선행되어야 함을 시사한다.

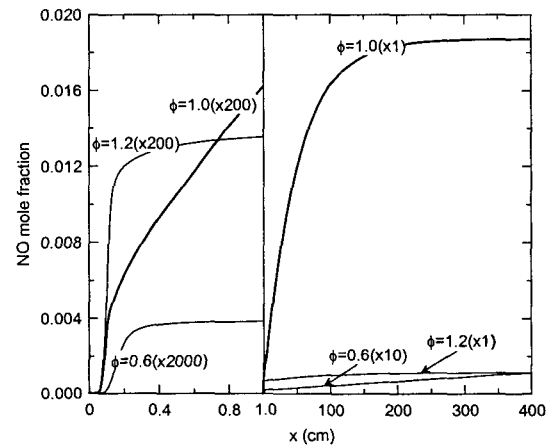


Fig. 4 NO mole fractions with the increase of axial distance for the different equivalence ratios

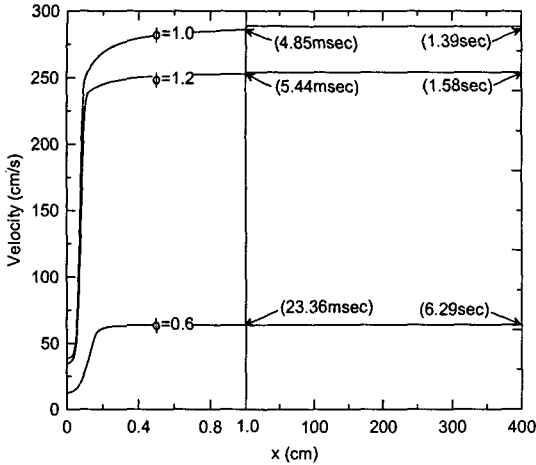


Fig. 5 Velocity profiles and residence times with the increase of axial distance

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 축방향 길이에 따른 유속과 체류시간을 도시한 것으로, 축방향 길이에 따른 NOx 배출특성을 체류시간의 측면에서 검토하기 위한 것이다. 팔호 안에 표기된 숫자는 해당 연소기 축길이(x=1.0cm 및 400cm)까지의 체류시간을 의미한다. 그림에서 $\phi=1.0$ 과 1.2의 경우에는 높은 온도에 의한 열 팽창효과로 인하여 $\phi=0.6$ 보다 약 5배 정도의 높은 속도를 갖게 된다. 그 결과 x=400cm를 기준으로 $\phi=0.6$, 1.0 및 1.2는 각각 6.29, 1.39 및 1.58sec의 체류시간을 갖게 된다. 이 정도의 체류시간은 실용 버너 및 로(Furnace)에서 실제로 사용되는 범위에 해당한다고 할 수 있다. 따라서 예혼합 연소기에서 적용 당량비 및 연소로 길이에 따라 NO 배출농도는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 화염대 근방에서의 값에 비해 수십 배에서 수백 배까지도 높아짐을 알 수 있다. 위 결과들은 예혼합 연소에서는 당량비에 상관없이 화염대 하류의 체류시간에 따른 NO의 증가현상을 충분히 고려하여야 함을 시사하는 것이라 여겨진다.

지금까지 고찰한 1차원 예혼합화염은 벽면을 단열조건이라 가정된 것으로, 화염 하류에서도 생성물의 온도가 높게 유지되는 경우이다. 그러나 대부분의 실용 연소기에서는 주 연소영역을 지나 하류로 갈수록 배기가스의 온도는 저온 공기와의 혼합, 복사, 대류 및 전도 열전달 등에 의해 감소하게 된다. 이와 같이 화염대 하류에서 열손실에 의한 화염온도의 감소가 존재할 때 체류시간에 따른 NO 생성특성은 단열화염의 경우와 다를 것으로 예상되며, 이 열손실 효과에 대한 검토는 실용적 측면에서 매우 중요하다. 이와 같은 배경 하에 이

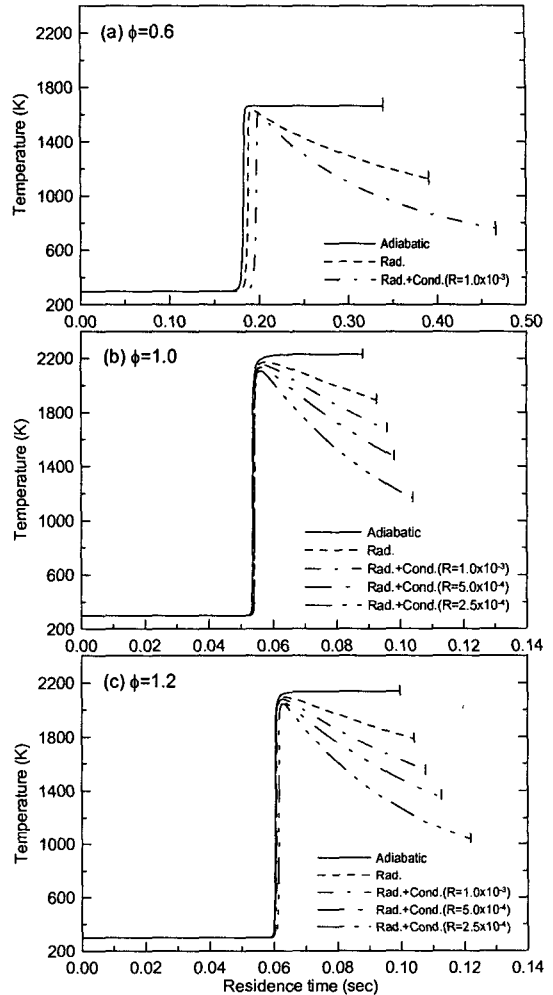


Fig. 6 Temperature profiles with residence time for the different heat loss in 10cm, height over burner; (a) $\phi=0.6$, (b) $\phi=1.0$, (c) $\phi=1.2$

하에서는 1차원 예혼합화염의 화염대 및 하류영역에서 복사 및 열전도에 의한 열손실이 NOx 배출특성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

3.2 복사 및 전도 열손실에 따른 NOx 생성특성
 화염 하류에서의 생성물의 온도저감, 즉 복사 및 전도 열손실에 정도에 따른 NOx 발생특성을 검토하기 위하여, Fig. 6과 7은 각각 대표적인 열손실 조건에서 축방향 길이에 따른 생성물 온도와 NO 물질유를 도시한 것이다. 연소기의 길이는 10cm로 고정하였으나, Fig. 5에서 확인되었듯이 당량비에 따라 연소기 내의 체류시간이 크게 변화되기 때문에 x축을 체류시간으로 표현하였다.

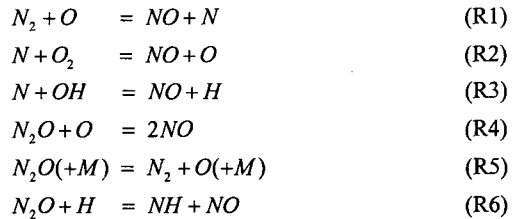
Fig. 6(a)에서 $\phi=0.6$ 의 경우, 단열조건일 때 화

염 하류영역에서 온도는 약 1700K으로 일정하지만, 복사 열손실만이 고려될 때 연소실 출구의 온도는 약 1200K, 복사 및 전도 열손실이 동시에 고려되었을 때는 약 800K으로 크게 감소됨을 볼 수 있다. 또한 열손실에 의해 화염면에서 출구까지의 체류시간이 약 2배까지 차이가 날 수 있음을 예측할 수 있다. Fig. 6(b)의 $\phi=1.0$ 에서는 $\phi=0.6$ 에 비해 높은 화염온도와 짧은 체류시간으로 인하여 동일 전도 열저항값(1.0×10^{-3})이 적용되었을 때 출구 온도가 크게 감소하지 않는다. 그러나 열저항값을 2.5×10^{-4} 으로 낮추어 전도 열전달을 증가시켰을 때 최종 출구의 온도는 약 1100K으로 감소됨을 볼 수 있다. $\phi=1.2$ 의 조건은 $\phi=1.0$ 과 유사한 온도분포를 보여주고 있으나, 초기 화염온도의 차이로 인하여 출구의 온도는 약 100K 정도 낮으

며, 체류시간이 조금 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서의 NO 물분율을 도시한 것으로서, $\phi=0.6$ 의 경우에 복사 열전달이 고려될 때 화염대 하류에서 추가적인 NO 증가 발생되지 않으며, 전도 열전달이 동시에 고려될 때 NO가 오히려 미소하게 감소되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 열손실 효과는 화염대 하류에서 NO의 추가적인 발생을 억제하지만, 단열조건과 비교할 때 출구에서의 NO 발생량의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 반면에 $\phi=1.0$ 에서는 복사 열손실만이 고려되더라도 화염대 이후에 NO의 추가적인 생성이 감소되어 단열조건과 비교할 때 출구에서의 NO값은 매우 큰 차이를 보이게 된다. 이는 Fig. 2에서 언급되었듯이 체류시간에 따라 비례적으로 발생하는 Thermal NO 생성이 복사 열손실에 의해 크게 감소되기 때문일 것으로 사료된다. 더욱이 추가적인 전도 열손실이 고려되었을 때 NO는 보다 상류에서 평형상태에 도달하게 되며 발생량도 점차적으로 감소하게 됨을 확인할 수 있다. $\phi=1.2$ 의 경우 역시 복사 열손실이 고려됨에 따라 하류에서 NO의 추가적인 발생은 존재하지 않으며, 전도 열손실이 증가함에 따라 오히려 NO가 크게 감소되고 있음을 볼 수 있다.

이에 대한 보다 구체적인 원인을 검토하기 위하여 Fig. 8은 연소기 출구($x=10\text{cm}$) 위치에서 NO 생성/소멸에 관련된 주요 반응들의 반응속도를 도시한 것이다. Thermal NO, Prompt NO 및 N₂O-경유 NO 기구와 관련된 모든 반응을 검토한 결과, 연소기 출구에서 NO의 생성과 소멸에 상대적으로 큰 영향을 주는 반응은 아래의 R1~R6와 같다. Prompt NO 관련 반응들은 출구에서 거의 존재하지 않아 생략되었다.



위 반응식에서 R1~R3는 Thermal NO 관련 반응이며, R4~R6는 N₂O-경유 NO와 관련된 반응들이다. $\phi=0.6$ 과 $\phi=1.0$ 에서 단열조건의 경우에 Thermal NO 관련 반응이 NO 생성에 가장 크게 영향을 미치고 있다. 또한 N₂O-경유 NO와 관련된 반응속도는 매우 작음을 볼 수 있다. 반면에 열손실 효과

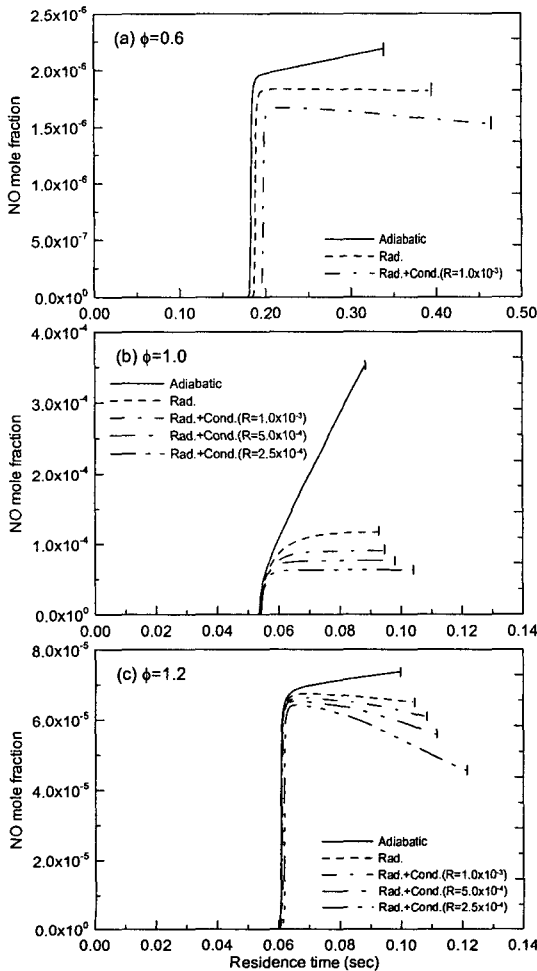


Fig. 7 NO mole fraction profiles with residence time for the different heat losses in 10cm, height over burner

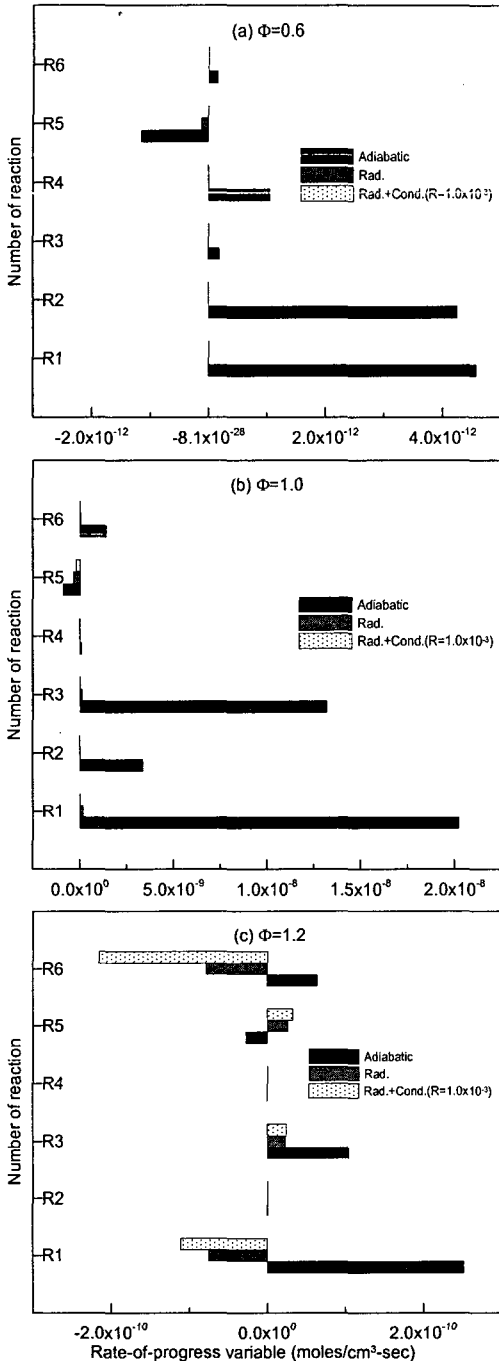


Fig. 8 Rate-of-progress variables of elementary reactions involving NO formation at the exit(x=10cm)

가 고려되었을 때 대부분의 NO 관련 반응들의 반응속도는 거의 0에 가까워 출구 근처에서 추가적인 NO 생성이 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있으며, 이는 Fig. 7(a)와 (b)의 하류영역에서 열

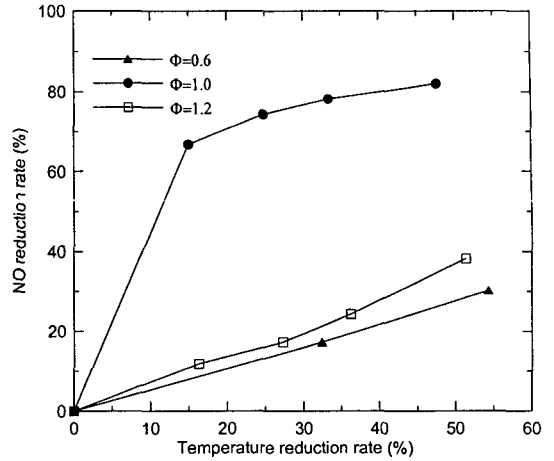


Fig. 9 NO reduction rate with heat loss rate at the exit (x=10cm)

손실에 의해 NO 생성이 발생되지 않는 결과를 잘 설명해주고 있다. 반면에 $\phi=1.2$ 에서는 열손실이 고려될 때 Thermal NO 관련 반응 중 R1과 N_2O -경유 NO 관련 반응 중 R6 반응에 의해 NO가 N_2 및 N_2O 로 변환되어 출구에서 NO의 발생량이 감소하게 된다. 열손실 효과가 증가되었을 때 이들 반응은 더욱 촉진되어 단열조건에 비해 약 1/3 이상 NO의 저감효과를 기대할 수 있음을 Fig. 7을 통해서 재확인할 수 있다.

Fig. 9는 연소기 출구(x=10cm)에서 단열조건을 기준으로 온도 저감율에 따른 NO 저감율을 도식한 것이다. 이때 온도 저감율과 NO 저감율은 다음 식 (14)~(15)에 의해 계산되었다.

$$\text{Temp. reduction rate}(\%) = \left(\frac{T_{ad.} - T}{T_{ad.}} \right)_{exit} \times 100 \quad (14)$$

$$\text{NO reduction rate}(\%) = \left(\frac{NO_{ad.} - NO}{NO_{ad.}} \right)_{exit} \times 100 \quad (15)$$

위 그림에서 $\phi=0.6$ 과 1.2의 경우, 온도 저감율이 약 50%에 도달할 때 단열조건에 비해 각각 약 30%와 40%의 NO 저감효과를 얻을 수 있으며, 온도 저감율에 대한 NO의 저감율이 비교적 선형적인 결과를 보여주고 있다. 반면에 $\phi=1.0$ 의 경우에는 온도 저감율이 약 15%에 증가하면 NO의 저감율은 약 70% 정도로 매우 크게 증가하나, 온도 저감율이 더욱 증가함에 따라 NO 저감율의 변화는 점차 감소됨을 알 수 있다.

일반적으로 총류 및 난류 예혼합화염은 $\phi=1.0$ 의 조건에서 약 1.0~2.5g/kg의 EI_{NO} 를 가짐을 기준

실험결과^(4,17)를 통해서 확인할 수 있다. 그러나 단열조건에 해당되는 Fig. 3의 결과에서 $\phi=1.0$ 의 화염은 약 8g/kg의 높은 EI_{NO}를 보여주고 있다. 이들의 차이는 70~80%의 NO 저감효과를 가져오는 복사 및 전도 열손실에 의한 설명될 수 있음을 Fig. 7과 Fig. 9를 통해 재확인 할 수 있다. 위의 연구 결과로부터 실용 연소기에서 화염대 하류의 열손실 효과는 연소기 출구에서의 정확한 NO_x 발생 예측 및 저감을 위해 매우 중요시 될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

1차원 CH₄/Air 예혼합화염을 대상으로 당량비에 따른 화염대의 NO_x 생성특성과 체류시간 및 열손실에 따른 화염 하류영역에서의 NO_x 생성특성을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 모든 당량비의 조건에 대해 화염대에서는 N₂O-경유 NO 기구가 포함된 Prompt NO 기구에 의해 대부분의 NO가 생성되며, 하류로 갈수록 Thermal NO 기구에 의한 NO 생성이 증가된다.

(2) 벽면이 단열조건일 경우에 모든 당량비에 대해 연소기 길이의 증가는 Thermal NO의 증가로 NO 배출량을 급격히 증가시키므로, 체류시간에 따른 NO 증가현상을 충분히 고려해야 한다.

(3) 복사 및 전도 열손실이 고려될 때 $\phi=0.6$ 과 1.0의 경우, 열손실로 인하여 화염대 이후 NO의 추가적인 생성이 거의 발생되지 않는다. 특히 $\phi=1.2$ 의 경우에는 열손실이 증가될 때 하류로 갈수록 NO는 오히려 소멸됨을 확인하였다.

(4) 예혼합 연소기의 전구간에서의 온도 저감을 및 체류시간의 변화는 화염 하류영역에서의 NO 반응기구에 큰 영향을 미치기 때문에 NO_x 배출지수 및 저감법에 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2006년도 인하공업전문대학 산업기술 연구소 학술연구과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Jung, W. S., Hwang, C. H., Lee, G. Y. and Lee, C. E., 2004, "The Combustion Characteristics of a New Cyclone Jet Hybrid Combustor for Low Pollutant Emission and High Flame Stability," *Transactions of the KSME B*, Vol. 28, No. 2, pp. 146~153.

(2) Smooke, M. D., Lin, P., Lam, J. K. and Ling, M. B., 1990, "Computational and Experimental Study of a Laminar Axisymmetric Methane-Air Diffusion Flame," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp. 575~582.

(3) Driscoll, J. F., Chen, R. H. and Yoon, Y. B., 1992, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effects of Residence Time and Damkoler Number," *Combustion and Flame*, Vol. 88, pp. 37~49.

(4) Lee, C. E., Oh, C. B. and Kim, J. H., 2004, "Numerical and Experimental Investigations of the NO_x Emission Characteristics of CH₄-Air Coflow Jet Flames," *Fuel*, Vol. 83, pp. 2323~2334.

(5) Han, J. W., Jeong, Y. S. and Lee, C. E., 2001, "The Effect of Turbulence Intensity on the NO_x Formation of Hydrogen Coaxial Jet Turbulent Diffusion Flames," *Transactions of the KSME B*, Vol. 25, No. 2, pp. 147~155.

(6) Correa, S. M. and Smooke, M. D., 1990, "NO_x in a Parametrically Varied Methane Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp. 238~295.

(7) Drake, M. C., Ratcliffe, J. W., Blint, R. J., Carter, C. D. and Laurendeau, N. M., 1990, "Measurements and Modeling of Flamefront NO Formation and Super-Equilibrium Radical Concentrations in Laminar High-Pressure Premixed Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp. 387~395.

(8) Tien, C. L., 1968, "Thermal Radiation Properties of Gases," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 253~32.

(9) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K. and Liu, F., 1997, "On the Extinction Limit and Flammability Limit of Non-Adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315~334.

(10) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flame," *SAND 85-8240*.

(11) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *SAND89-8009B*.

(12) Kee, R. J., Dixon-Lewis, Warnatz, G. J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multi-Component Transport," *SAND86-8246*.

(13) GRI Mech. Ver. 3.0, Web Address: http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.

(14) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 98, pp. 127~138.

(15) Takeno, T. and Nishioka, M., 1993, "Species Conservation and Emission Indices for Flames Described by Similarity Solutions," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 465~448.

(16) Correa, S. M., 1992, "A Review of NO_x Formation

- Under Gas-Turbine Combustion Conditions,” *Combustion Science and Technology*, Vol. 87, pp. 329~362.
- (17) 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,” *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 627~639.