

## CH<sub>4</sub>/Air 예혼합화염의 고효율 연소조건에서

### 열손실에 따른 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출특성

현승호\* · 황철홍\*\* · 이창언\*\*\* · 김세원\*\*\*\* · 장기현\*\*\*\*\*

## Emission Characteristics of NO<sub>x</sub> and CO with Heat Loss Under High Efficiency Combustion Conditions of CH<sub>4</sub>/Air Premixed Flame

Seung-Ho Hyun, Cheol-Hong Hwang, Chang-Eon Lee, Se-Won Kim and Gi-Hyun Jang

### ABSTRACT

Emission characteristics of NO<sub>x</sub> and CO with heat loss under high efficiency combustion conditions of CH<sub>4</sub>/Air premixed flame were examined numerically using detailed-kinetic chemistry. The one-dimensional combustor length was fixed 5cm, and the equivalence ratio was varied from 0.75 to 0.95. To consider the effects of heat loss on NO<sub>x</sub> and CO formation, the radiative heat loss rate and combined heat loss rate of conductive and convective heat transfer are included. The following conclusions were drawn. In order to reduce the NO<sub>x</sub> and CO emission level simultaneously, the temperature of product gases must be reduced under 1,800K as soon as possible but kept over 1,300K during the residence time which is needed to converge CO to CO<sub>2</sub>.

**Key Words** : Premixed Flame, Heat Loss, Post-Flame Region, CO Emission, NO<sub>x</sub> Emission

### 1. 서 론

일반적으로 예혼합화염은 비예혼합화염보다 화염길이가 짧고 당량비의 조절을 통한 낮은 화염온도로 인하여 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출지수(Emission index)를 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있다[1]. 이러한 장점을 활용하여 최근 가스터빈 및 보일러 등을 비롯한 대부분의 실용 연소기에서 회박예혼합 연소방식을 적용하여 NO<sub>x</sub> 배출농도를 저감시키고 있다[2,3]. 그러나 연소조건에서 당량비가 회박할수록 배기량이 많아지기 때문에 시스템 열효율은 낮아지게 된다. 최근 에너지 절약적인 관점에서 시스템의 열효율을 높이지 않으면 안 되기 때문에, 예혼합 연소에서 당량비 1에

가까운 높은 당량비에서 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출농도를 저감해야 하는 난점이 부각되고 있다.

예혼합방식의 연소기에 대한 기존의 연구로는 실용적 측면으로 연료/공기의 혼합제어기술 등을 이용한 화염안정화 연구에 주로 초점이 맞추어졌다. 또 예혼합 연소기에서의 NO<sub>x</sub> 저감법에 대해서는 혼합비, 혹은 선회기를 이용한 난류강도의 변화 등의 비교적 간단한 실험적 연구[4,5]가 진행되었다. 예혼합화염에서 NO<sub>x</sub>에 관한 대표적인 연구로는 Correa 등[6]이 넓은 범위의 압력(1~10atm)과 당량비(0.6~1.0)의 조건에서 NO<sub>x</sub> 생성 특성을 검토한 바 있으며, Drake 등[7]이 고압조건에서 NO 생성원인을 검토한 바 있다. 이들 연구들은 NO<sub>x</sub> 생성기구의 분리법을 통해 화염구조와 NO<sub>x</sub>의 생성원인에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으나, 주로 화염영역 1.0cm 이내에서만 관찰하여 관찰한 것이다. 그러나 실용 연소기의 경우, 화염대에서 생성된 NO<sub>x</sub> 및 CO는 연소기 출구에 도달하는 동안에 열교환기 혹은 작업 공정을 거치면서 열손실에 따른 추가적인 NO<sub>x</sub> 및 CO 생성 및 소멸반응을 동반하게 된다. NO<sub>x</sub> 및

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* Building and Fire Research Lab., NIST

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

† 연락처자 E-mail : chelee@inha.ac.kr

\*\*\*\* 한국생산기술연구원

\*\*\*\*\* 린나이 코리아(주) 기술연구소

CO 배출지수가 열손실 과정을 거친 연소기 출구에서의 값임을 감안할 때 화염대를 포함한 화염 하류영역에서의 NOx 및 CO 생성특성에 대한 규명은 실용 연소기 및 연소시스템 설계에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 최근에 NOx 및 CO등을 포함한 오염물질의 환경규제가 더욱 강화되고 있어, 이러한 기준을 만족할 수 있는 미래형 저공해 버너로서 NOx 및 CO 배출농도 모두 20ppm 이하를 목표로 하여 연구가 진행되고 있다[8]. 이러한 저공해 조건을 만족하면서 동시에 고효율을 달성하기 위해서는 당량비가 1에 가까운 높은 연소조건에서의 NOx 및 CO 발생특성 및 저감법에 대한 체계적인 연구가 절실히 필요한 실정이다. 따라서 화염하류에서의 복사 열전달 및 열교환기에 의한 열손실이 NOx 및 CO 생성에 미치는 영향을 규명하고, 이를 적극적으로 활용하여 강화되고 있는 환경규제에 대응할 필요가 있다.

이와 같은 배경 하에 본 연구에서는 1차원 CH<sub>4</sub>/Air 예혼합 화염을 대상으로 화염하류에서의 열손실에 따른 NOx 및 CO 생성특성 및 배출농도의 변화를 살펴보았다. 1차원 연소기 길이를 5cm로 고정하여 당량비를 0.75~0.95의 범위에서 변화시켰다. 화염 하류에서의 복사 열손실은 화염과 주변온도차에 의해 계산하였으며, 전도 및 대류 열손실은 유효 열손실계수를 인위적으로 조절하여 연소기 출구의 배출온도를 변화시켰다. 본 연구에서는 우선 단일조건에서의 NOx, CO 배출특성을 검토하였다. 이를 근거로 화염하류의 열손실 정도에 따른 NOx 및 CO의 배출 경향 및 저감 대책을 검토하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구는 상세반응기구를 이용한 예혼합 화염을 대상으로 화염 하류 영역에서의 열손실에 따른 NOx, CO 배출특성을 검토하였다. 계산은 1차원 자유전파 메탄(CH<sub>4</sub>) 예혼합화염을 대상으로 하였으며, 연소기의 길이는 5cm로 고정하여 관찰하였다. 화염하류에서의 열손실은 복사, 전도 및 대류에 의해 발생하나, 본 계산에서는 복사 열손실은 화염과 주변온도차에 의해 계산하였으며, 전도 및 대류에 의한 열손실은 유효 열손실계수(Effective heat loss coefficient)를 도입하여 인위적으로 변화시켰다. 계산에 이용한 지배방정식으로 연속, 화학종, 에너지 및 상태 방정식은 각각 다음과 같다[9].

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

$$\dot{M} \frac{dY_k}{dx} = - \frac{d}{dx} (\rho A Y_k V_k) + A \dot{\omega}_k W_k \quad (k=1,2,3,\dots,K) \quad (2)$$

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

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

여기서  $x$ 는 공간좌표,  $\dot{M}$ 는 질량유량,  $A$ 는 단면적,  $T$ 는 온도,  $p$ 는 압력,  $u$ 는 혼합물의 속도,  $\rho$ 는 밀도,  $Y_k$ ,  $W_k$ ,  $c_{p,k}$ ,  $\dot{\omega}_k$ ,  $h_k$ 들은 각각  $k$ 번째 화학종의 질량분율, 분자량, 정압비열, 단위 체적당 물생성열, 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,  $\lambda$ 는 혼합물의 열전도계수,  $c_p$ 는 혼합물의 정압비열,  $\dot{q}_{rad}$ 와  $\dot{q}_{cond,v}$ 는 복사 및 복합된 전도-대류 열손실율을 의미한다.

계산에 이용된 경계조건은 식 (5)~(6)과 같다.

$$x = -\infty (\text{미연가스 상류 측});$$

$$T(-\infty) = T_u, Y_k(-\infty) = Y_{k,u} \quad (5)$$

$$x = +\infty (\text{기연가스 하류 측});$$

$$\frac{dT}{dx}(+\infty) = 0, \frac{dY_k}{dx}(+\infty) = 0 \quad (6)$$

### 2.2 열손실 모델링

연소기의 총 열손실량은 연소기의 설계 및 운전조건 등에 의해 결정되기 때문에, 이론적으로 복사, 전도 및 대류의 열손실을 명확히 구분하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 화염하류에서 열손실량 변화에 따른 NOx 및 CO 생성특성을 검토하기 위하여 열손실 모델을 크게 두 가지로 분류하였다. 즉, 전도 및 대류 열손실은 한 개의 유효 열손실계수를 이용하여 변화시켰으며, 이들과 달리 절대온도의 4제곱에 비례하는 복사열손실은 독립적으로 고려되었다.

1차원 정상상태의 계산에서 전도 및 대류 열손실율의 합( $\dot{q}_{cond,v}$ )은 식 (7)과 같이 표현될 수

있다. 전도 열손실에서 상수  $k$ 는 연소기 벽면의 재질에 의해 결정되는 열전도계수이며,  $\delta$ 와  $T_\infty$ 는 벽면의 두께 및 주위 온도를 의미한다. 또한 대류 열전달계수( $h$ )는 일반적으로 가스조성과 유속, 점성 및 온도 등에 의해 영향을 받게 된다. 이들의 매우 복잡한 영향을 체계적으로 고려하기 위하여, 본 연구에서는 식 (8)과 같이  $W/m^2K$ 의 단위를 갖는 한 개의 유효 열손실계수( $h_{eff}$ )를 도입하였다.

$$\dot{q}_{cond,v} = -\frac{k}{\delta}(T - T_\infty) - h(T - T_\infty) \quad (7)$$

$$\dot{q}_{cond,v} = -h_{eff}(T - T_\infty) \quad (8)$$

복사 열손실 효과를 반영하기 위하여 Optically thin model[10]을 이용하였으며, 열손실에 주로 기여하는 것으로 알려진 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>의 4가지 화학종을 고려하였다. 단위 체적당 복사 열손실은 다음 식에 의해 계산되었다.

$$\dot{q}_{rad} = -4\sigma K_p(T^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

$$K_p = P_{CO_2}K_{CO_2} + P_{H_2O}K_{H_2O} + P_{CO}K_{CO} + P_{CH_4}K_{CH_4} \quad (10)$$

여기서  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수,  $T$ 와  $T_\infty$ 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.

$$K_k = \sum_{j=0}^4 A_{kj} T^j \quad (k = CO_2, CO, H_2O, CH_4) \quad (11)$$

여기서  $A_{kj}$ 는 온도에 따른 각 화학종의 다항 식계수로써 Ju 등[11]에 의해 사용된 값을 적용하였다.

### 2.3 계산 방법

본 연구에서는 Premix code[9]를 수정하여 계산을 수행하였으며, 열역학 및 전달 물성치는 각각 Chemkin-II[12]와 Transport package[13]를 사용하였다. 계산은 CH<sub>4</sub>/Air 화염을 대상으로 하였으며, 당량비( $\phi$ )는 0.75~0.95의 범위에서 변화시켰다. 반응물 입구온도와 연소기내 압력은 각각 298.15K과 1atm으로 하였다. 화염하류의

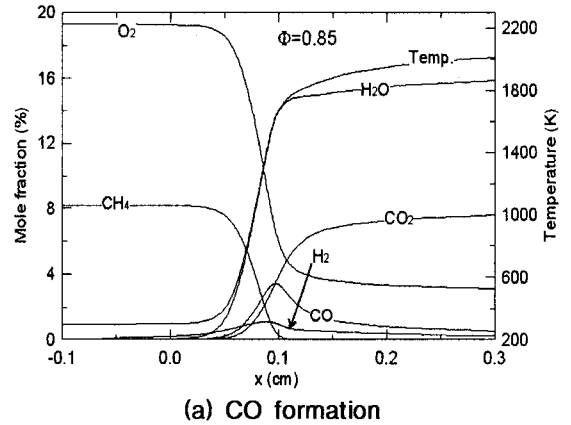
NO<sub>x</sub> 및 CO 특성을 검토하기 위하여 계산영역은 0cm에서 5cm까지 계산하였다. 연료 및 NO<sub>x</sub>에 대한 상세반응기구로는 GRI 3.0[14]을 이용하였다. 이 반응기구는 CH<sub>4</sub>의 산화반응에 대해 C<sub>2</sub>반응까지 포함하며, Thermal NO, Prompt NO, N<sub>2</sub>O-경유 NO 및 NO<sub>2</sub> 생성기구 등 NO<sub>x</sub>의 전 반응경로를 상세하게 묘사하고 있다.

## 3. 결과 및 검토

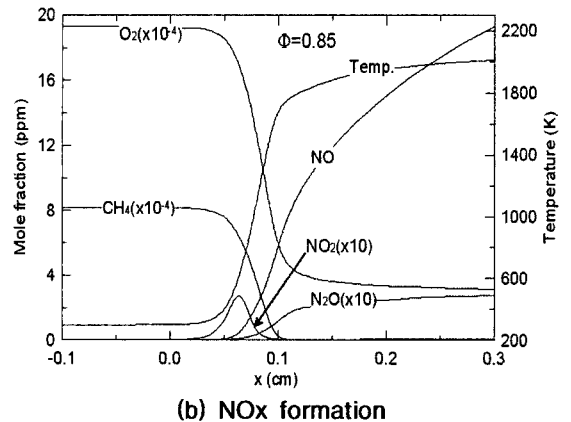
### 3.1 단열 조건의 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출 특성

본 절에서는 예혼합 화염의 화염대 및 화염하류 영역에서의 열전달에 따른 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출 특성을 살펴보기에 앞서, 우선 단열조건에서의 화염대 및 화염하류 영역에서의 NO<sub>x</sub>, CO 배출 특성을 살펴보고자 한다.

Fig. 1은 당량비( $\phi$ ) 0.85인 예혼합 화염을 대상으로 화염대 근방의 CO 생성특성(Fig. 1 (a)) 및



(a) CO formation



(b) NO<sub>x</sub> formation

Fig. 1 Species mole fractions and temperature profiles for a laminar, CH<sub>4</sub>-air premixed flames ( $\phi=0.85$ )

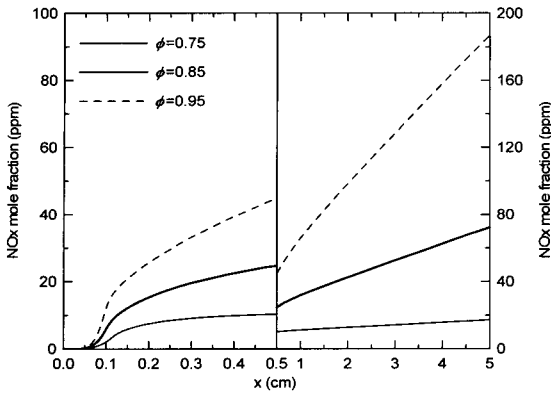


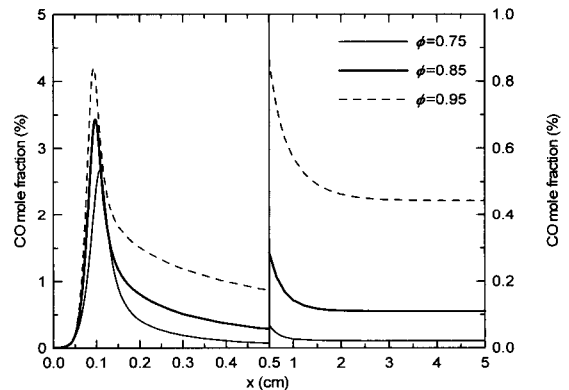
Fig. 2 NOx mole fractions with the increase of axial distance for different equivalence ratios

NOx 생성특성(Fig. 1(b))을 상세히 살펴보기 위해  $x=0.3\text{mm}$ 까지의 온도 및 관련 화학종의 농도를 도시한 것이다. 그림에서  $x$ 축은 예혼합 화염의 반응 시작점( $x=0.0\text{cm}$ )에서의 거리를 나타내며,  $y$ 축은 몰농도(왼쪽) 및 온도(오른쪽)를 나타낸다. 각종 몰농도의 배수(scale)를 조절하여 동일 좌표로 나타내었으며, 농도들의 실제 값은  $y$ 축의 농도 값에 괄호안의 배수로 나누어 주면 구해진다. 우선, Fig. 1(a)에서 CO 생성특성을 살펴보면,  $\text{CH}_4$  농도가 급격히 감소하면서 온도가 급격히 상승하는  $0.03\text{mm} < x < 0.1\text{mm}$  사이에 화염대가 형성되고, 그 하류에서 점점 평형상태에 접근하면서 생성물 온도는  $x=0.3\text{mm}$ 에서 약  $2,000\text{K}$ 에 도달한다. CO의 몰분율은 화염대에서 급격히 상승하기 시작하여 최대  $3.5\%$  정도가 되며, 이 화염대를 지나면서 급속히 감소한 후 서서히 감소한다.  $\text{CO}_2$ 는 CO보다 다소 늦게 발생하기 시작하며, 화염대 하류에서 CO가  $\text{CO}_2$ 로 전환되면서 서서히 증가한다. 다음에 Fig. 1(b)에 제시한 NOx 생성특성을 종류별로 살펴보면, NO는 화염대에서 발생하기 시작하며 화염대 하류에서도 계속 증가하여  $0.3\text{mm}$  단면에서 약  $20\text{ppm}$  정도가 된다.  $\text{NO}_2$ 는 화염대 전반부의 저온영역에서 약  $0.25\text{ppm}$ 의 최고치에 달한 후 화염대 후반부에서 소멸하고 있다. 즉,  $\text{NO}_2$ 는 화염대에서 확산된 NO가 저온영역에서  $\text{HO}_2$  및 O 라디칼과 반응하여 생성되나 다시 고온영역으로 이동하면서 NO로 전환되어 소멸됨을 알 수 있다(6). 따라서  $\text{NO}_2$ 는 연소기 출구에서의 NOx 배출농도에는 영향을 미치지 않는다. 한편,  $\text{N}_2\text{O}$ 는 NO가 NH 및 NCO등과 반응하여 생성되고, O, H 및 OH 라디칼과 반응하여  $\text{N}_2$  및 NO로 환원되는 것으로, 화염대 직후에서 발생하기 시작하며 하류에서도 서서히 증가한다. 본 그림의 범위에서는 최대  $0.25\text{ppm}$  정도로  $\text{NO}_2$ 와 같이 NO 농도

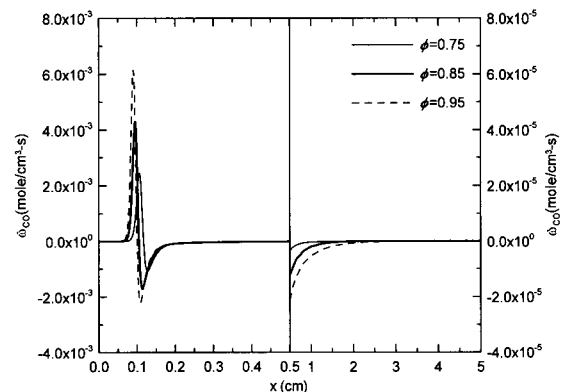
에 비해 미량 존재한다.

Fig. 2는 단열조건에서의 당량비에 따른 화염 하류  $x=5\text{cm}$ 까지의  $\text{NO}_2$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 를 포함하는  $\text{NO}_x$  몰분율을 도시한 것이다. 참고로, Table 1은 화염 하류  $5\text{cm}$ 인 연소기 출구에서의 당량비에 따른 생성물 온도,  $\text{NO}_x$  및 CO 농도를 나타낸 것이다. 표1에서 생성물의 온도는  $\phi=0.75, 0.85$  및  $0.95$ 에서 각각  $1920\text{K}, 2070\text{K}$  및  $2190\text{K}$  정도로 당량비  $0.1$ 의 차이에 약  $120\sim 150\text{K}$  정도의 온도차가 있으며,  $\text{NO}_x$  배출농도는 각각  $17, 73$  및  $187\text{ppm}$  정도로 당량비 변화에 따라 크게 차이가 남을 알 수 있다. Fig. 2에서 당량비  $0.75$ 의 경우 NO 농도는 화염대 직후에서 다소 증가하나 화염대 하류에서는 거의 변화가 없다. 이 경우 연소기 출구에서도  $\text{NO}_x$  농도가  $20\text{ppm}$  이하로  $\text{NO}_x$  배출농도 측면에서 매우 양호하다고 할 수 있다.

그러나 당량비  $0.85$ 와  $0.95$ 와 같이 당량비가 1에 가까운 경우에는 NO 농도가 화염대 하류에서도



(a) CO mole fractions



(b) CO production rates

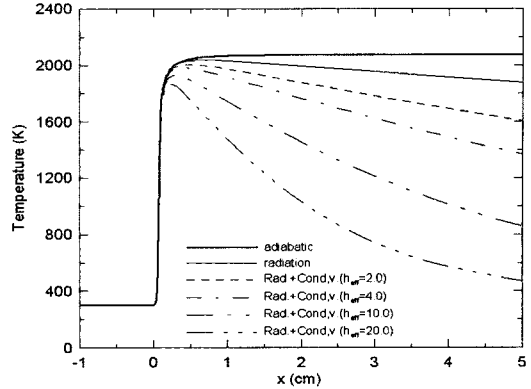
Fig. 3 Variation in CO mole fractions and production rates with combustor length for various equivalence ratios

계속 증가함을 알 수 있다. 그 이유로는 생성물의 온도가 1800K 이상인 경우에는 화염대 하류에서도 NO가 지속적으로 생성됨을 NO<sub>x</sub> 생성을 자료에서 확인되었다. 단, 이 NO<sub>x</sub> 생성을 자료는 Fig. 2로부터 유추가 가능하여 본 논문에는 제시하지는 않았다. 이와 같이 당량비 0.85의 경우에도 NO<sub>x</sub> 배출농도가 70 ppm 이상이 되어 심각함을 알 수 있다. 위 결과로부터 고효율을 달성할 목적으로 높은 당량비 조건에서 운전하는 연소 시스템에서 NO<sub>x</sub> 배출농도를 낮추기 위해서는 화염대는 물론 화염대 하류 영역에서의 NO<sub>x</sub> 발생을 최대한 억제할 수 대책이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 당량비 조건에서 CO 물분율(Fig. 3(a)) 및 CO 생성율(Fig. 3(b))을 화염하류 x=5cm까지 도시한 것이다. 모든 당량비에서 CO농도는 화염대에서 최대값에 도달한 후에 화염대 직후에서 급격히 감소한 후에 그 이하 영역에서도 서서히 감소함을 알 수 있다. 본 그림과 같이 단열조건인 경우 화염대에서의 최대 CO 농도는  $\phi=0.75, 0.85$  및  $0.95$ 에서 각각 2.5%, 3.5% 및 4.3% 정도로 매우 높으며, 하류에서 CO가 CO<sub>2</sub>로 전환되면서 x=5cm 출구에서의 배출농도는 각각 약 215, 1,100 및 4,450 ppm으로 낮아지고는 있으나, 이 배출농도들은 매우 높은 수치임을 알 수 있다. 이들 CO 농도의 변화 경향은 Fig. 3(b)의 생성을 분포에 의해 잘 설명된다. 즉, CO 생성율은 화염대에서는 매우 큰 양(+)의 값을 가지나, 화염대 직후에서는 CO가 CO<sub>2</sub>로 전환되면서 음(-)의 값을 가지며, 이 전환 과정은 화염하류 x=2cm근방까지 지속된 후 그 이후에는 생성율이 0에 접근하며 생성물의 평형상태에 도달함을 알 수 있다. 실제 시스템에서 배출가스의 온도는 작업 공정 및 열교환기로의 열손실로 인해 낮아지며, 이에 동반하여 CO 배출농도들도 감소하게 될 것이다. 그러나 CO 배출 농도를 목표치에 해당하는 농도로 저감하기 위해서는 화염하류에서의 열손실 정도에 따른 CO 배출 특성을 상세히 파악할 필요가 있다.

**3.2 열손실 조건의 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출특성**

화염하류에서의 열손실은 복사, 전도 및 대류에 의해 발생하는데, 본 연구에서는 복사 열손실은 화염과 주변온도차에 의해 계산하였으며, 전도 및 대류 열손실은 한 개의 유효 열손실 계수를 이용하여 인위적으로 변화시켰다. 본 계산에서는 연소기 길이를 5cm로 고정하여, 식 (8)의 유효 열손실계수( $h_{eff}$ )를 변화시켜 열손실량을 인위적으로 조절하여 연소기 출구의 배출온도를 변화시켰다.



**Fig. 4 Variation in temperature profiles with combustor length for different heat loss scenarios ( $\phi=0.85$ )**

Fig. 4는 당량비 0.85인 예혼합 화염에서 여러 가지 열손실 시나리오에서의 축방향 거리에 따른 생성물의 온도 변화를 도시한 것이다. 우선 단열 조건에서는 화염대에서 약 2000K이던 생성물 온도가 하류영역인 5cm에서는 다소 상승하여 약 2070K 정도가 된다. 복사 열손실만을 고려한 경우 화염대의 온도는 단열조건과 유사하나, 하류로 갈수록 온도가 점차 감소하여 x=5cm출구에서의 온도는 약 1870K 정도로 약 200K정도가 감소한다. 그리고 복사 및 복합 열손실을 고려하면, 유효 열손실계수( $h_{eff}$ )의 증가에 따라 화염대의 온도도 다소 낮아지면서, 연소기 출구 온도가 크게 감소함을 알 수 있다. 본 계산의 경우에는 x=5cm 출구에서의 생성물 온도가 약 1600K에서 400K가 되도록 열손실계수를 변화시켜 보았다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 열손실 조건에서의 NO물분율을 변화를 도시한 것이다. 단열조건에서의 NO는 화염대 이후에도 계속 증가하여 x=5cm인 출구에서의 NO 농도는 약 72ppm임을 확인할 수 있다. 그리고 복사 열손실만 고려한 경우에는 화염대 하류에서의 NO 생성량이 많이 감소하여 출구에서의 NO값은 약 38ppm으로, 단열조건과 비교하여 약 30ppm 이상의 차이를 보이고 있다. 복사 및 유효 열손실계를 동시에

**Table 1 단열조건인 연소기 출구(x=5cm)에서의 생성물 온도, NO<sub>x</sub> 및 CO 배출농도**

당량비 ( $\Phi$ )	T <sub>ad</sub> (K)	NO <sub>x,ad</sub> (ppm)	CO <sub>ad</sub> (ppm)
0.75	1920	17.28	214.2
0.85	2071	72.29	1096
0.95	2192	186.80	4452

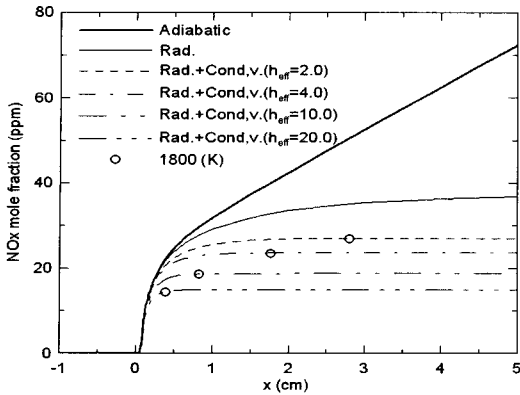
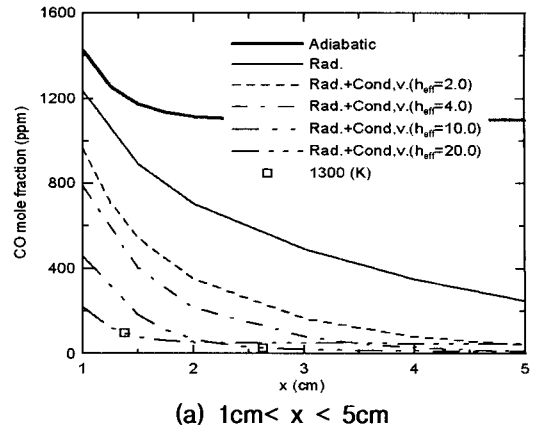


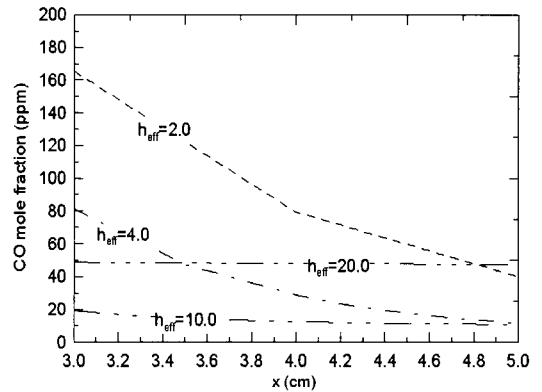
Fig. 5 Variation in NO<sub>x</sub> mole fraction profiles with combustor length for different heat loss scenarios ( $\phi=0.85$ )

고려한 경우, 열손실이 증가할수록 출구에서의 NO농도는 더욱 감소하며, 출구온도가 400K정도가 되도록 급속 열손실이 발생한 경우는 NO 배출농도가 15ppm 정도까지 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 NO농도는 각 열전달 조건에서 생성물 온도가 1,800K가 되는 지점(○)까지는 다소 증가하다 그 이후에는 NO 생성이 동결됨을 알 수 있다. 이와 같이 화염 하류에서의 열손실의 증가는 우선 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 화염대의 생성물 온도를 저하시켜, 화염대에서의 NO<sub>x</sub> 발생량을 감소시키고, 동시에 하류에서 NO 생성을 동결시켜 NO 배출량을 감소시킴을 알 수 있다. 따라서 화염하류에서 열전달에 의한 NO<sub>x</sub> 저감을 도모하기 위해서는 생성물의 온도를 가능한 한 화염대에 가까운 거리에서 1,800K 이하로 낮추는 전략이 필요함을 알 수 있다. 단, 이와 같은 화염하류에서의 열손실 증가가 CO 배출 농도에 미치는 영향에 대해서는 다음 그림을 이용하여 검토하겠다.

Fig. 6은 동일한 열손실 조건에서 축방향 길이에 따른 CO 몰분율( $\chi_{CO}$ )의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에는 축방향 길이가  $1\text{cm} < x < 5\text{cm}$ 의 범위를 도시하였으며, 그림 중에 사각 심벌(□)은 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응이 동결되는 생성물 온도가 1300K가 되는 지점을 나타낸다. Fig. 6(b)는 연소기 출구에서의 CO 배출농도의 변화를 상세히 살펴보기  $3\text{cm} < x < 5\text{cm}$  영역을 확대하여 도시한 것이다. 그림에서 출구 생성물 온도가 1300K보다 높은 열손실계수( $h_{eff}$ ) 4 보다 작은 경우에는 하류로 이동함에 따라 CO농도가 감소하며, 열손실이 증가할수록 CO 배출농도가 적어진다. 그러나, 출구 온도가 1,300K 이하가 되는 열손실 조건에서는 생성물 온도가 약 1300K인 지점부터 CO농도가 감소하지 않고 일



(a)  $1\text{cm} < x < 5\text{cm}$



(b)  $3\text{cm} < x < 5\text{cm}$

Fig. 6 Variation in CO mole fraction profiles with combustor length for different heat loss scenarios ( $\phi=0.85$ )

정한 값을 유지함을 알 수 있다. 그 이유로는 생성물 온도가 1300K 이하에서는 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응이 동결되기 때문임을 CO 생성물의 분포에서 확인하였다. 그리고 이 조건에서는 열손실 너무 급속히 발생하면 CO 배출농도는 오히려 높아짐을 알 수 있다. 즉, Fig. 6(b)에서 열손실계수가 20인 경우의 CO 배출농도는 열손실계수가 10인 20 ppm 보다 더 높은 약 50 ppm정도가 된다. 이 결과는 CO 배출농도는 열손실 증가하면 감소하기도 하나 열손실이 너무 급격한 경우에는 오히려 CO 배출 농도가 증가하기도 함을 의미하며, 앞에서 언급한 NO 배출농도는 열손실이 증가할수록 무조건 감소하는 경향과도 다름을 알 수 있다.

Fig.5와 Fig. 6의 열손실에 따른 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출 특성을 근거로, 고효율 예혼합 연소조건에서 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출농도를 동시에 저감하기 위해서는 화염대에서 가능한 빨리 생성물의 온도를

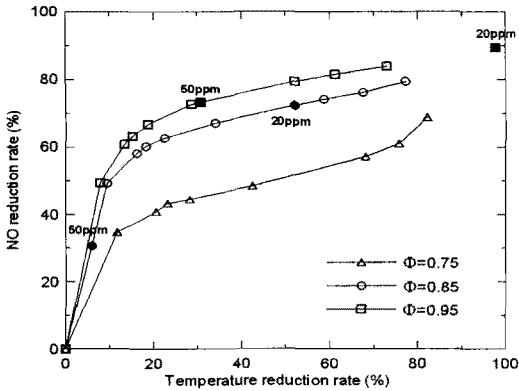


Fig. 7 Variation of NO<sub>x</sub> reduction rates with the heat loss rate at post-flame region

1,800K 이하로 저감시켜 화염하류에서의 NO<sub>x</sub> 발생을 억제해야 하나, 생성물의 온도가 1,300K 로 이하로 떨어져 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응이 동결되지 않도록 충분한 전환 시간을 고려하여 열손실을 발생시며야 함을 알 수 있다. 즉 화염 대 이후 가능한 한 빨리 생성물의 온도를 1,800K 이하로 낮추면서, 그 이후에는 생성물의 온도를 1300K이상 유지하도록 열손실을 억제키면서 열 전달이 일어나도록 열교환기를 설계해야 함을 알 수 있다. 단, 이 열교환기의 설계에 있어서 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응에 필요한 체류시간에 대한 정보에 대해서는 추후 연구에서 밝히고자 한다.

Fig. 7은 연소기 출구에서 단열조건을 기준으로 온도 저감율에 따른 NO<sub>x</sub> 저감율을 도시한 것이다. 각 당량비 조건에서의 50 ppm 혹은 20 ppm 기호는 각각의 당량비 조건에서 이들 목표치를 달성하는데 필요한 온도 저감율을 제시한다. 단 열조건 각 당량비에서의 출구온도, NO 및 CO 농도는 Table 1에 제시되어 있으며, 온도 및 NO<sub>x</sub> 저감율은 식(14), (15)에 의해 계산되었다.

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

$$NO_x reduction rate(\%) = \left( \frac{NO_{x,ad} - NO_x}{NO_{x,ad}} \right)_{exit} \times 100 \quad (15)$$

Fig. 7을 살펴보면 당량비가 높을수록 온도 저감율에 따른 NO<sub>x</sub> 저감효과가 높게 나타나며, 또 모든 당량비에서 온도 저감율이 높을수록 NO<sub>x</sub> 농도는 감소함을 알 수 있다. 즉, 당량비 0.85 및 0.95의 경우에는 온도 저감율 20%까지는 급속하게 NO<sub>x</sub>가 감소하여 약 60%의 NO<sub>x</sub> 저감 효과가 있으며, 그 이상의 온도 저감 범위에서는 NO<sub>x</sub> 저감효과가 다소 완만하게 나타난다. 한편,

당량비 0.75의 경우에는 온도 저감율 약 20%까지는 급속하게 약 40%의 NO<sub>x</sub> 저감효과가 있으며, 그 이상의 온도 저감에서는 NO<sub>x</sub> 저감효과가 작음을 알 수 있다. 각 당량비 조건에서 NO<sub>x</sub> 배출 농도의 목표치인 50 ppm 혹은 20 ppm을 달성하는데 필요한 온도 저감율을 비교해 보면, 당량비가 0.95인 경우에는 본 계산 범위 내에서는 열손실에 의한 온도 저감만으로는 목표치 20ppm을 달성하지 못하며, 목표치 50ppm은 30%의 온도 저감율에 의해 달성됨을 알 수 있다. 그리고 당량비가 0.85인 경우에는 NO 배출농도를 20ppm이하로 낮추기 위해서는 50%이상의 온도 저감이 필요하며, 50ppm은 약 6%의 온도 저감에 의해 달성됨은 나타낸다. 한편 당량비 0.75인 경우에는 단열화염의 경우에도 출구 NO<sub>x</sub> 농도가 약 17ppm 정도로 열손실의 없는 경우에도 20ppm이 달성됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 유사하게 연소기 출구에서 단열 조건을 기준으로 온도 저감율에 따른 CO 저감율을 도시한 것이다. 그림에서 당량비 0.75의 CO 저감 곡선은 0.85의 경우와 거의 중복되어 y축의 기준을 10 이동한 오른쪽 y좌표를 이용하여 도시하였다. 각 당량비의 저감곡선에 표시된 50 ppm 기호는 이들 목표치를 달성하는데 필요한 온도 저감율을 나타낸다. 단열조건에서의 출구 CO 농도는 Table 1에 제시되어 있고, 열손실에 의한 CO 저감율은 식(16)에 의해 계산되었다.

Fig. 8에서 온도 저감율에 따른 CO 저감 곡선이 거의 동일한 분포를 보이고 있어, 온도 저감에 따른 CO 저감효과는 당량비에 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다. 온도 저감율에 따른 CO

$$CO reduction rate(\%) = \left( \frac{CO_{ad} - CO}{CO_{ad}} \right)_{exit} \times 100 \quad (16)$$

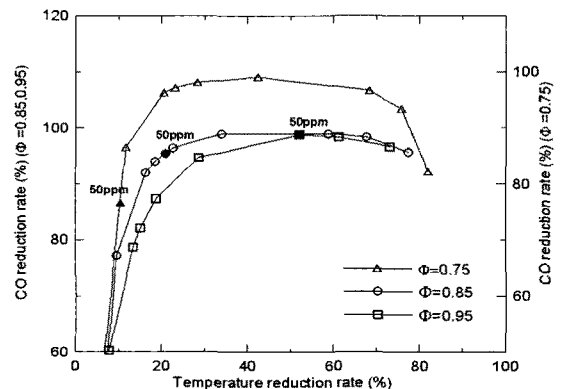


Fig. 8 Variation of CO reduction rate with the heat loss rate at post-flame region

저감율을 살펴보면, NO의 경우에는 다르게, CO 저감율은 일정 수준까지는 온도 저감율에 비례하여 증가하다가 그 이후에는 다시 저감율이 감소하는 경향을 보인다. 이 결과는 본 계산의 경우 연소기 길이를 5cm로 고정하여 출구온도를 감소시켰기 때문에 열손실이 너무 급속하게 이루어진 경우에는 CO 전환 반응이 동결되어 CO 배출농도가 높아짐을 의미한다. 따라서 열전달 촉진에 의한 CO 배출농도의 저감시키기 위해서는 CO에서 CO<sub>2</sub>로 전환 시간을 고려하여 열전달을 수행하여야 CO 배출농도를 줄일 수 있으며, 너무 과도하게 냉각시키면 오히려 역효과가 발생함을 알려준다. 이들 열전달에 의한 CO 저감의 최적 조건에 대해서는 추후에 연구하기로 하겠다. 각각의 당량비 조건에서 CO 저감 경향을 상세하게 살펴보면 다음과 같다. 당량비 0.75의 경우에는 단일조건 CO 배출 농도는 약 215ppm이며, 10%의 온도저감에 의해 목표치 50ppm이 달성된다. 그리고 약 40%의 온도 저감에 의해 최저인 2ppm까지 달성이 가능하나, 그 이상으로 생성물을 냉각시킨 경우에는 오히려 CO 배출농도는 증가한다. 당량비 0.85의 경우에는 약 20%의 온도저감에 의해 50ppm이 달성되며, 약 50%의 온도저감에 의해 최저인 20ppm까지 달성됨을 알 수 있다. 당량비 0.95의 경우에는 약 50%의 온도저감에 의해 목표치 50ppm까지는 달성이 가능하나, 그 이상 과도하게 냉각하면 오히려 CO 배출농도가 증가하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 연소기 길이가 5cm인 1차원 CH<sub>4</sub>/Air 예혼합 화염을 대상으로 고효율 연소조건에서의 화염하류에서의 열손실에 따른 NO<sub>x</sub> 및 CO 생성특성, 배출농도 및 저감대책을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화염하류의 열손실 증가에 따른 NO<sub>x</sub> 배출농도의 저감효과는 당량비가 높을수록 높게 나타나며, 모든 당량비에서 열손실이 증가할수록 NO<sub>x</sub> 배출 농도는 감소한다.
- 2) 화염하류에서 열전달에 의한 NO<sub>x</sub> 저감 효과를 최대화하기 위해서는 화염대 이후의 생성물의 온도를 가능한 빨리 1,800K 이하로 낮추는 전략이 필요하다.
- 3) 화염하류의 열손실에 따른 CO 배출농도의 저감효과는 NO의 경우와는 다르게 일정 수준의 열손실까지는 열손실에 비례 감소하나, 과도하게 급속 냉각시킨 경우에는 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응이 동결하여 오히려 역효과가 발생한다.
- 4) NO<sub>x</sub> 및 CO 배출농도를 동시에 저감하기 위해서는 화염대 이후 가능한 한 빨리 생성물의 온

도를 1,800K 이하로 낮추면서 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응에 필요한 체류시간동안 1300K 이상 유지하도록 열교환기를 설계해야 한다.

- 5) 각각의 당량비 조건에서 CO에서 CO<sub>2</sub>로의 전환반응에 필요한 체류시간에 대한 정보는 추후 연구에서 밝히고자 한다.

#### 후 기

본 연구는 2007년 에너지관리공단 에너지자원 기술개발사업 및 산업자원부 증기거점사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Lee, C. E., Oh, C. B. and Kim, J. H., "Numerical and experimental investigations of the NO<sub>x</sub> emission characteristics of CH<sub>4</sub>-air coflow jet flames," *Fuel*, Vol. 83, 2004, pp. 2323-2334.
- [2] Lefebvre, A. H., "The role of fuel preparation in low emission combustion," *ASME J. Eng. Gas Turbine Power*, Vol. 117, 1995, pp. 617-654.
- [3] Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M. and Scott, M. J., "Premixed turbulent instability and NO formation in a lean-burn swirl burner," *Combust. Flame*, Vol. 115, 1998, pp. 515-538.
- [4] Semerjian, H. and Vranos, A., "NO<sub>x</sub> formation in premixed turbulent flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 16, 1977, pp. 169-179.
- [5] Elkotb, M., Salem, H., Shehata, H. and Abou-Arab, T. W., "Factors affecting NO<sub>x</sub> formation in turbulent premixed confined flame," *Fuel*, Vol. 69, 1990, pp. 65-71.
- [6] Correa, S. M. and Smooke, M. D., "NO<sub>x</sub> in a parametrically varied methane flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 23, 1990, pp. 238-295.
- [7] Drake, M. C., Ratcliffe, J. W., Blint, R. J., Carter, C. D., and Laurendeau, N. M., "Measurements and modeling of flamefront NO formation and super-equilibrium radical concentrations in laminar high-pressure pre-mixed flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 23, 1990, pp. 387-395.
- [8] 이현용, 김종현, 황철홍, 임대택, 이창언, "싸이클론 유동을 이용한 예혼합 다단연소기의 NO<sub>x</sub> 배출특성," *제35회 한국연소학회 심포지움 논문집*, 2007, pp. 156-161.



- [9] Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., "A fortran program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flame," *SAND 85-8240*, 1994.
- [10] Tien, C. L., "Thermal radiation properties of gases," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, 1968, pp. 253-324.
- [11] Ju, Y., Guo, H. Maruta K. and Liu, F. "On the extinction limit and flammability limit of non-adiabatic stretched methane-air premixed flames," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 32, 1997, pp. 315-334.
- [12] Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., "Chemkin-II: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics," *SAND89-8009B*, 1989.
- [13] Kee, R. J., Dixon-Lewis, Warnatz, G. J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., "A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multi-component transport," *SAND 86-8246*, 1994.
- [14] GRI Mech. Ver. 3.0, web address: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)