

〈論 文〉

## 복사열전달을 고려한 상호작용하는 예혼합화염의 수치해석

임인권\* · 정석호\*\*

(1994년 10월 14일 접수)

### Numerical Study of Interacting Premixed Flames Including Gas Phase Radiation

In-Gweon Lim and Suk-Ho Chung

**Key Words :** Gas Radiation(가스상 열복사), NOx(질소산화물), Emission(배출물), Counterflow Flame(대향류화염)

#### Abstract

Characteristics of premixed flames in counter-flow system are numerically studied using a detailed chemical reaction mechanism including gas phase radiation. Without radiation effect accounted, low CO and high NOx emission indices are observed, when strain rate decreases, due to increased residence time and higher flame temperature. Higher NO<sub>2</sub> production has been also observed when two premixed flames are interacting or cold air stream is mixed with burned gas. The rate of NO<sub>2</sub> production and destruction is dependent upon the diffusional strength of H and OH radicals, the existence of NO and the concentration of HO<sub>2</sub>. For radiating flames, the peak temperature and NOx production rate decreases as the strain rate decreases. At high strain rate, it is found that the effect of radiation on flame is little due to its negligible radiating volume. It is also found that NOx production from the interacting premixed flame is reduced due to reduced temperature resulting from radiation heat loss. It is concluded that the radiation from gas has significant effect on flame structure and on emission characteristics.

#### 기 호 설 명

$a$  : 스트레인율(strain rate) 또는 속도구배  
 $C_p$  : 혼합물의 평균 정압비열  
 $C_{pk}$  : 화학종  $k$ 의 정압비열  
 $f'$  : 유동함수  
 $h_k$  : 화학종  $k$ 의 엔탈피  
 $K$  : 화학종의 개수  
 $p$  : 압력  
 $q_R$  : 복사열전달률  
 $R$  : 일반기체상수  
 $T$  : 온도  
 $u$  : 반경방향 속도

$v$  : 축방향 속도  
 $\bar{W}$  : 평균 분자량  
 $W_k$  : 화학종  $k$ 의 분자량  
 $x$  : 반경방향 좌표  
 $y$  : 축방향 좌표  
 $Y_k$  : 화학종  $k$ 의 질량분율  
 $\mu$  : 점성계수  
 $\lambda$  : 열전도율  
 $\rho$  : 밀도  
 $V_{ky}$  : 화학종  $k$ 의  $y$ 방향 확산속도  
 $\omega_k$  : 화학종  $k$ 의 생성율

\*정회원, 서울대학교 터보동력기계연구센터

\*\*정회원, 서울대학교 기계공학과

## 1. 서 론

가정용 연소기, 보일러 및 가스터빈 등의 실제 연소기에서는 유동이 화염에 영향을 주고 화염 또한 유동에 영향을 주는 상호작용이 존재한다.<sup>(1,2)</sup> 유동과 화염의 상호작용 및 난류 연소를 이해하기 위한 모델로서 층류 소화염 모델<sup>(3,4)</sup>이 제안된 이후, 층류 소화염의 특성은 스트레치와 불균일한 농도장 및 온도장에 의한 소화염간의 상호작용에 의존한다고 알려져 왔다. 난류화염의 화염면은 주름져 있으며 주름진 면에서의 곡률에 의해서 화염이 스트레치되며 화염면의 소화염들은 서로 상호작용을 한다. 이에 따라 화염전파속도, 가연한계 및 소염메카니즘 등의 화염 특성이 층류화염과는 상이하다. 많은 이론과 실험에서 유동 스트레인을 효과적으로 묘사할 수 있는 대향류 유동장을 해석모델로 사용하여 화염의 제반특성인 화염위치, 전파속도, 소염점 등을 스트레치, Lewis수, 당량비 등에 따라 예측하기도 하였다.<sup>(5,6)</sup> 실제 여러 연소기에서 사용되는 분체식 연소방식은 화염끼리 서로 상호작용하며, 산화제와 연료의 불완전한 혼합으로 인해 예혼합기의 농도가 서로 다를 수 있다. 예혼합기의 농도가 서로 다른, 상호작용하는 화염에서 NOx의 배출특성은 화염끼리의 열전달, 화학종의 분포 및 반응물의 변화로 인해 다르게 나타날 수 있다. 질소를 포함하지 않는 연료의 연소시 NOx는 주로 고온의 화염부에서 Thermal NOx경로를 통하여 생성되며, NOx는 주로 NO의 상태로 배출되어 NO<sub>2</sub>/NOx의 비율은 작다고 알려져 있다.<sup>(7)</sup> NO<sub>2</sub>는 NO보다 인체에 훨씬 더 유해하고, 연소기설계에서 NO<sub>2</sub>/NOx의 비율은 연소후 처리장치의 선택시 중요하다.

화염의 상호작용시 화염끼리 또는 화염과 주변으로의 복사열전달이 있으며, 이는 화염온도의 변화를 초래하고 이에 따라 화염전파속도, 소염한계 및 공해물질의 생성 등의 화염특성이 달라진다고 알려져 있다.<sup>(8,9)</sup> 실제 보일러 등 연소기의 열전달 기구는 대류 및 전도보다는 복사 열전달에 의하므로 연소기의 설계시 복사열전달의 고려는 필수 불가결하다. 화염의 복사형태는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 수증기(H<sub>2</sub>O)가스에서의 가시광선 및 적외선과 매연입자(soot) 및 재(ash) 등의 고체 물질에서의 복사로 정

의될 수 있다. 화염구조의 연구시 종종 복사열전달을 고려하지 않는 이유는 가스 복사량이 고체면에서의 복사량에 비하여 상대적으로 작고 또한 이의 해석이 매우 복잡하고 많은 양의 계산 및 연구를 필요로 하기 때문이다. 그렇지만 실험실 규모의 작은 화염에서도 복사 열손실로 인해 화염 구조가 변화한다고 알려져 있다.<sup>(9)</sup>

본 연구는 상호작용하는 예혼합화염에서의 NOx 생성 및 소멸 특성을 알아보기 위해서 복사열전달 효과를 고려하여 대향류화염을 모델로 하여 수치해석을 행하였으며, 이를 위하여 상세화학반응 메카니즘을 사용하였다. 이를 통해서 화염에 대한 복사 열전달의 영향을 밝히고 이에 따라 변화하는 대향류화염의 특징을 살펴보았다. 화염의 상호작용 및 복사열전달의 영향에 의한 질소산화물의 생성을 알아보기 위해서 이와 관련된 반응을 고려함으로써 이의 배출특성을 알아 보았다.

## 2. 모델 및 해석방법

### 2.1 지배방정식 및 가스상 복사 모델

본 연구에서 사용된 대향류화염 모델의 개략적인 형태는 Fig. 1에 나타나 있다. 서로 마주보는 노즐에서 예혼합기(Premixture)가 분출되어 반응지역을 형성하고 두 반응지역 사이에 정체면이 존재한다. 정상상태이고 층류인 정체점유동에 대하여 화학반응을 고려할 때 연속, 운동량, 화학종 및 에너지방정식으로 구성되는 정체점유동의 경계층방정식(boundary-layer equation)은 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(10-12)</sup>

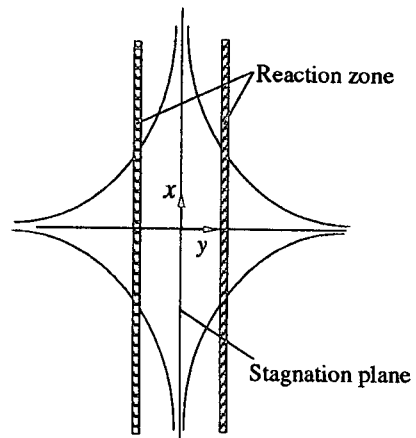


Fig. 1 Geometry of counter-flow flame model

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\rho u \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_k V_{ky}) - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (3)$$

$k=1, 2, \dots, K$

$$\rho u C_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_{ky} C_{pk} \frac{dT}{dy} + \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k W_k h_k = 0 \quad (4)$$

여기에,  $u = axf'$ 와  $V = \rho v$ 의 새로운 변수들을 정의하면 위의 경계층 방정식들은  $x=0$ 상의 유선에 대하여 다음과 같이 상미분방정식으로 변환될 수 있다.

연속방정식 :

$$\frac{dV}{dy} + 2apf' = 0 \quad (5)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{d}{dy} \left( \mu \frac{df'}{dy} \right) - V \frac{df'}{dy} + a[\rho_{\infty} - \rho(f')^2] = 0 \quad (6)$$

화학종방정식 :

$$\frac{d}{dy} (\rho Y_k V_{ky}) + V \frac{dY_k}{dy} - \dot{\omega}_k W_k = 0 \quad (7)$$

$k=1, 2, \dots, K$

에너지방정식 :

$$\frac{d}{dy} \left( \lambda \frac{dT}{dy} \right) - C_p V \frac{dT}{dy} - \sum_{k=1}^K \rho Y_k V_{ky} C_{pk} \frac{dT}{dy} - \sum_{k=1}^K \dot{\omega}_k W_k h_k - \frac{dq_R}{dy} = 0 \quad (8)$$

끝으로 상태방정식은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{p\bar{W}}{RT} \quad (9)$$

모델의 중요한 인자인 유동 스트레인을(strain rate)은 스트레치의 정도를 나타내며, 화염면에서 유동의 속도구배를 통하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 일정한 스트레인에 대하여 두 노즐에서의 분출 속도를 구하는 방법을 사용하였다. 연속방정식에 대해서는 정체점에서 속도가 0이 되는 경계조건을 사용하였으며, 나머지 방정식들에 대한 경계조건들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{at } y = -\infty \\ f' = \sqrt{\rho_{\infty} / \rho_{-\infty}} \\ Y_k = Y_{k-\infty} \\ T = T_{-\infty} \quad k=1, 2, \dots, K \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{at } y = \infty$$

$$f' = 1$$

$$Y_k = Y_{kinf}$$

$$T = T_{\infty} \quad k=1, 2, \dots, K \quad (11)$$

에너지방정식에 나타나는 가스 복사열전달(radiation heat flux)항은 광학적 두께(optical thickness)가 작고 회색체(gray-medium)라는 가정하에 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(13)</sup>

$$\frac{dq_R}{dy} = 2K_p(2\sigma T^4 - B_{\infty} - B_{-\infty}) \quad (12)$$

여기서,  $B_{\infty}$ 와  $B_{-\infty}$ 는 양쪽 경계에서의 복사열전달을 나타내며, 각각  $\sigma T_{\infty}^4$ 와  $\sigma T_{-\infty}^4$ 의 형태를 가진다. 가스상 물질의 복사에서 연소와 관련된 화학종의 경우  $\text{CO}_2$ 와  $\text{H}_2\text{O}$ 가 복사의 흡수와 방사에 가장 중요한 역할을 하므로 Planck의 평균 흡수계수( $K_p$ )를 다음과 같이 정의하였다.

$$K_p = p[X_{\text{CO}_2} K_{p,\text{CO}_2}(T) + X_{\text{H}_2\text{O}} K_{p,\text{H}_2\text{O}}(T)] \quad (13)$$

또한  $\text{CO}_2$  및  $\text{H}_2\text{O}$ 의 평균 Planck 흡수계수는 다음으로부터 구해진다.

$$\log_{10} \left( \frac{K_{p,i}}{K_{p,i,ref}} \right) = \sum_{n=0}^6 a_{i,n} \left( \frac{T}{300.0 \text{ K}} \right)^n \quad (14)$$

이에 사용된 계수는 Rogg<sup>(13)</sup>가 사용한 Polynomial 계수를 사용하였다. 기타 화학종의 복사열전달 방출 및 흡수는 무시할 수 있을 정도로 미약하므로 이에 대한 복사는 고려하지 않았다.

## 2.2 해석방법

화염에서 화학반응에 의한 화학종들의 생성 및 소멸의 기술을 위해서 29개 화학종 및 76개의 화학반응단계로 구성되어 있는 상세화학 반응메카니즘(detailed chemical kinetics)<sup>(14)</sup>을 기본으로 사용하였다. 이 메카니즘은 높은 수의 탄소를 포함하는 반응을 고려할 수 있으며 여러 연구자에 의해 실험과 비교 검증되었다. 대항류화염에서 thermal NOx의 생성 및 소멸을 이해하고 이의 화염간 상호작용 및 연소조건 등과의 관계를 알아보기 위하여 기본 상세화학 반응메카니즘에 확장된 Zeldovich의 NOx 반응식 및  $\text{NO}_2$ 에 관계된 반응<sup>(15)</sup>들을 추가했다. 본 연구에 사용된 수치해석 프로그램은 Smooke에 의해 개발된 것이며, 복사열전달의 고려를 위해 가스 에너지방정식이 수정되었다. 복사 열전달을 고려하지 않은 상태의 해를 구한 다음 이를

복사를 고려한 계산의 초기치로 사용하였다. 모델의 해를 구하기 위한 수치해석 방법은 뉴턴의 방법(Newton's method)과 시간적분(time integration)의 조합으로 이루어져 있다. 시간적분 방법은 확실한 수렴성을 가졌으나 정상상태로의 수렴이 매우 느려 비효율적인데 반해 뉴턴의 방법은 초기값이 수렴영역 내에 들어있는 경우 매우 빠른 수렴성을 가지고 있다. 본 연구에서는 정상상태 문제를 뉴턴의 방법으로 풀어보고 수렴에 실패할 경우 일정 시간 동안 시간적분을 하여 수렴영역 내에 들어오도록 시도한 다음 뉴턴의 방법으로 해를 구하였으며 계산의 정확성과 효율을 증대시키기 위해서 적응격자방법(adaptive gridding method)을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 거친 격자에서 해를 구한 후에 계산된 해의 값이나 이의 기울기가 급격히 변하는 지역에 새로운 격자점들을 추가함으로써 정확한 계산 결과를 얻을 수 있게 하였다. 해석방법에 대한 자세한 기술은 여러 연구자에 의해 발표되었으므로<sup>(16)</sup> 여기서는 생략한다.

모델에 사용된 화학 반응항, 열역학적 물성치 및 전달 물성치의 계산은 Chemkin<sup>(17)</sup>과 Tranait<sup>(18)</sup>을 이용하고, 계산은 IBM RISC system/6000를 이용하여 double precision으로 수행하였다. 스트레인이 작아질수록 계산에 소요되는 시간이 많아지며 대체로 1~5시간의 계산을 필요로 한다. 혼합기는 메탄과 공기로 이루어져 있으며 노즐 출구에서의 온도는 298.0 K이며 압력은 1기압이다. Nishioka 등<sup>(19)</sup>은 화염에서 배출되는 배출물의 양을 정량적으로 비교하기 위해서 배출계수(emission index)를 사용하였다. 이는 연소된 연료의 양에 대한 생성된 화학종의 질량비로 나타내며, NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$EI_{NOx} = \frac{\int_{-L}^L W_{NOx} \dot{\omega}_{NOx} dx}{\int_{-L}^L W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} dx}$$

$$EI_{CO} = \frac{\int_{-L}^L W_{CO} \dot{\omega}_{CO} dx}{\int_{-L}^L W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} dx} \quad (15)$$

여기서, 적분은 양쪽 노즐 사이의 길이에 대한다.

### 3. 결과 및 검토

대향류화염 연구를 위한 기본 계산으로 메탄 성분이 체적 비율로 혼합기의 7%인 경우에 대해 스

트레인을 변화시키면서 계산을 수행하였다. 복사열전달을 고려하지 않은 조건 하에서 유동의 속도, 온도 변화, 화학종의 생성 및 소멸과정을 알아보았다. 복사열전달 효과를 고려한 경우는 다음 3.2절에서 논한다. Fig. 2는 노즐의 양쪽에서 7%~7%의 동일한 혼합기가 배출되는 경우에 스트레인의 변화에 따른 온도 및 속도의 변화를 보여주고 있다. 각 화염의 최대온도는 정체점(x=0.0)에서 나타나며, 스트레인이 커짐에 따라 화염들이 정체점에 가깝게 위치하여 화염끼리의 거리가 가까워지며 화염의 최대온도가 낮아짐을 알 수 있다. 스트레인이 작아짐에 따라서 화염사이의 거리가 멀어지며 화염의 최대 온도는 단일화염온도에 근접하다가 이를 초과한다. 여기서, 단일화염온도(~1866 K)는 7% 메탄/공기 예혼합기에 대하여 PREMIX code<sup>(20)</sup>를 이용하여 구하였다. 최대온도가 단일화염온도를 초과하는 이유는 7% 예혼합기에 대하여 메탄의 Lewis수가 1보다 작기 때문이다. Fig. 3은

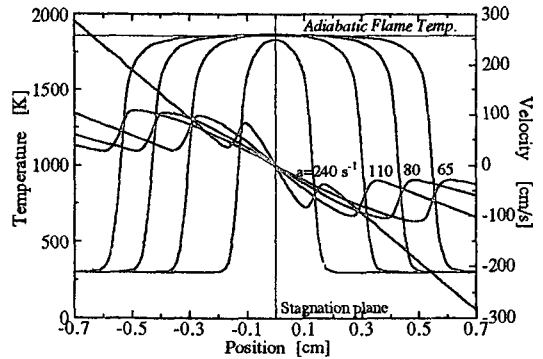


Fig. 2 Temperature and velocity profiles for a=65, 80, 110 and 240 s<sup>-1</sup>

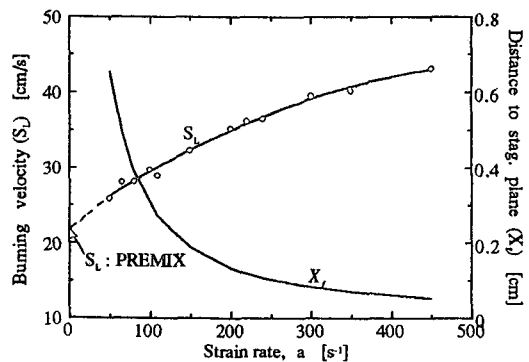


Fig. 3 Flame speed and distance from stagnation plane to flame for various strain rates

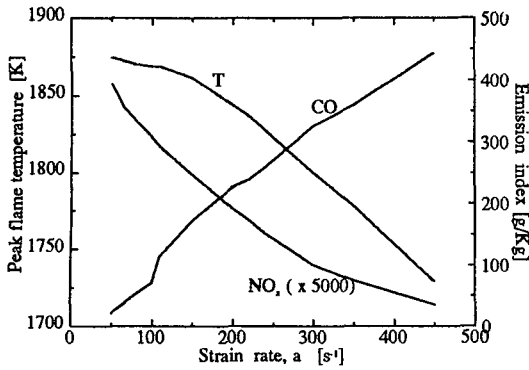


Fig. 4 Peak flame temperature and CO, NO<sub>x</sub> emission index for various strain rates

스트레인율의 변화에 따른 화염전파속도 및 정체점에서 화염까지의 거리( $x_f$ )를 나타낸다. 정체점에서 화염까지의 거리는 정체점으로부터 유동의 속도가 최대로 되는 화염면까지의 거리를 의미한다. 7% 예혼합기에 대하여 PREMIX로 구해진 1차원 단일 예혼합화염(스트레인율=0)의 화염전파속도는 약 22 cm/s이다. 스트레인율이 작아짐에 따라 화염전파속도는 이 값에 가까워짐을 알 수 있다. Fig. 4는 스트레인율에 대한 화염의 최대온도 및 NO<sub>x</sub>와 CO의 배출계수를 나타내고 있다. 스트레인율이 작아질수록 화염의 최대온도가 증가하고 연소된 가스의 체류시간이 길어진다. 이에 따라 NO<sub>x</sub>의 생성 및 CO의 소멸에 관련한 반응들의 반응률이 증대되므로 CO의 배출량은 감소하며 NO<sub>x</sub>는 더욱 증가한다. 이와는 반대로 스트레인율이 증가할 때는 화염온도가 상대적으로 낮고, 체류시간이 감소하므로 CO의 배출량은 증가하고 NO<sub>x</sub>의 배출은 감소한다.

3.1 상호작용하는 화염의 NO<sub>x</sub> 배출 특성

산화제와 연료의 불완전한 혼합으로 인한 두 화염의 예혼합기 농도가 서로 다를 때의 NO<sub>x</sub>의 배출특성은 유동조건 및 화염의 상태에 따라 달라질 수 있다. Fig. 5는 스트레인율을 110 s<sup>-1</sup>으로 고정시키고 한쪽 혼합기의 농도가 변화할 경우의 온도 및 속도분포를 나타낸다. 농도가 7%와 7%인 대칭 화염에서 한쪽 농도가 줄어들수록 화염의 최대 온도 및 화염부의 온도는 감소하며, 화염이 정체점으로 이동함을 알 수 있다. 연료 농도가 낮은 화염이 정체점으로 훨씬 더 많이 움직이는데, 이는 연료

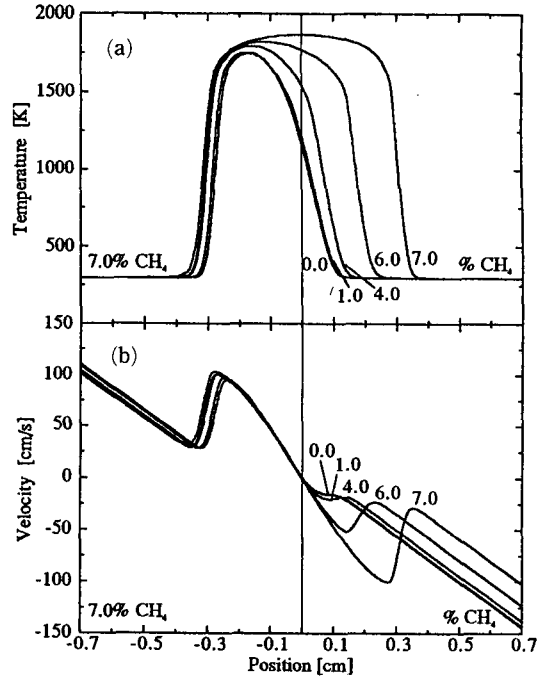


Fig. 5 Temperature(a) and velocity(b) profiles for counter-flow flame of  $a=110 \text{ s}^{-1}$  with CH<sub>4</sub> mole fraction change

농도가 낮아짐에 따라서 온도가 감소하여 반응율이 감소하기 때문이다.

Fig. 6은 NO 및 NO<sub>2</sub>의 몰분율을 나타내고 있다. 온도와와의 관계를 알아보기 위해서 점선으로 온도 분포를 나타내었다. 한쪽 혼합기의 농도가 감소하면서 NO의 생성은 전체적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 한쪽 화염이 정체점에 가까워짐에 따라서 체류시간은 길어지나, 정체점 부근의 온도 감소로 인해서 Thermal NO<sub>x</sub> 반응에 의한 NO<sub>x</sub>의 생성이 억제됨에 기인한다. 7%~7%를 제외한 경우 NO가 최대 분포하는 곳의 위치가 온도의 최대점과 일치하지 않으며, 정체면으로 약간 이동하였음을 알 수 있다. 화염이 최대 온도를 가지는 지역에서 정체점으로 온도가 감소하고 정체점 부근에서는 Thermal NO<sub>x</sub> 반응이 일어나기에는 어려운 온도분포를 가지고 있으므로, 이 부근에서의 NO의 분포는 흥미롭다. 한쪽 화염의 농도가 작아질수록 NO<sub>2</sub>의 최대값은 대칭화염의 경우보다 높아지며 농도가 약 4%인 경우에 최대를 보이고 다시 감소하지만, 전체적으로 대칭화염보다 높다. 이는 연소된 가스에 존재하는 NO에서 NO<sub>2</sub>로의 변환이 공기와

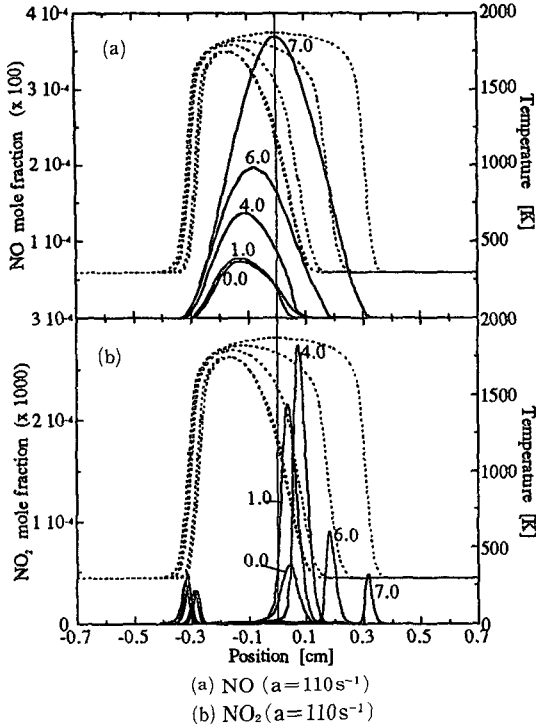


Fig. 6 NO (a) and NO<sub>2</sub>(b) mole fraction(solid line) and temperature(dotted line) profiles for counter-flow flame of a=110 s<sup>-1</sup> with CH<sub>4</sub> mole fraction change

의 혼합 및 연료의 첨가에 의해서 증진된다고 보인 Sano<sup>(21)</sup> 및 Hori 등<sup>(22)</sup>의 결과와 일치한다. Fig. 7은 한쪽 연료 농도가 0% 및 4%인 경우에 대한 여러 화학종들의 분포를 나타낸다. 일반적으로 예혼합화염에서 높은 NO<sub>2</sub>의 생성은 주로 고온의 화염부에서 생성된 NO가 확산에 의하여 화염면을 통과하고, 확산된 NO가 NO+HO<sub>2</sub>=NO<sub>2</sub>+OH 반응에 의해 화염 전면에서 NO<sub>2</sub>로 변화함에 기인한다고 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 이렇게 생성된 NO<sub>2</sub>는 다시 화염쪽으로 확산 및 대류되어 주로 NO<sub>2</sub>+H=NO+OH 반응에 의해서 NO로 변화하여 감소하다가 다시 고온에서는 증가한다.<sup>(20)</sup> 본 연구의 화염들에서도 이와 같은 경향을 볼 수 있다.

Fig. 8은 7%~0% 및 7%~4% 경우에 대하여 NO와 NO<sub>2</sub>의 확산, 대류 및 반응물들의 관계(budget)를 나타낸 것이다. 여기서 음의 값을 가지는 반응물은 화학종의 생성을 의미한다. 연료 농도가 높은 화염의 고온부에서 생성된 NO는 노즐 및 정체점으로 주로 확산에 의해 이동하며, 이동된

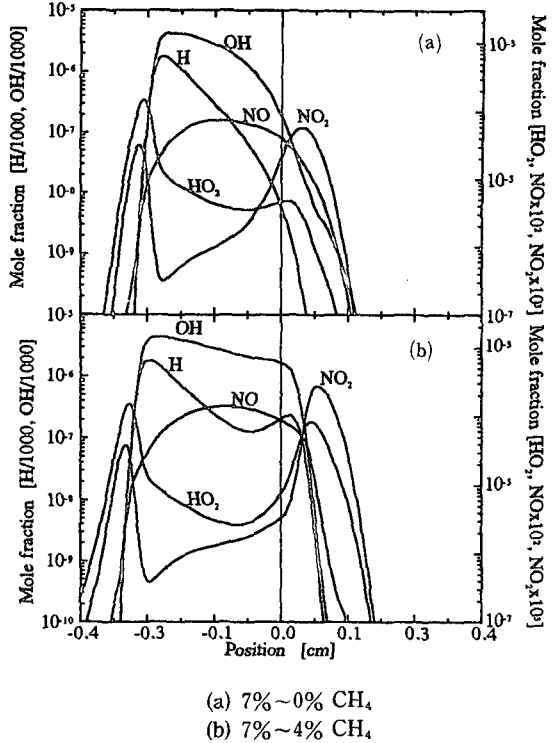
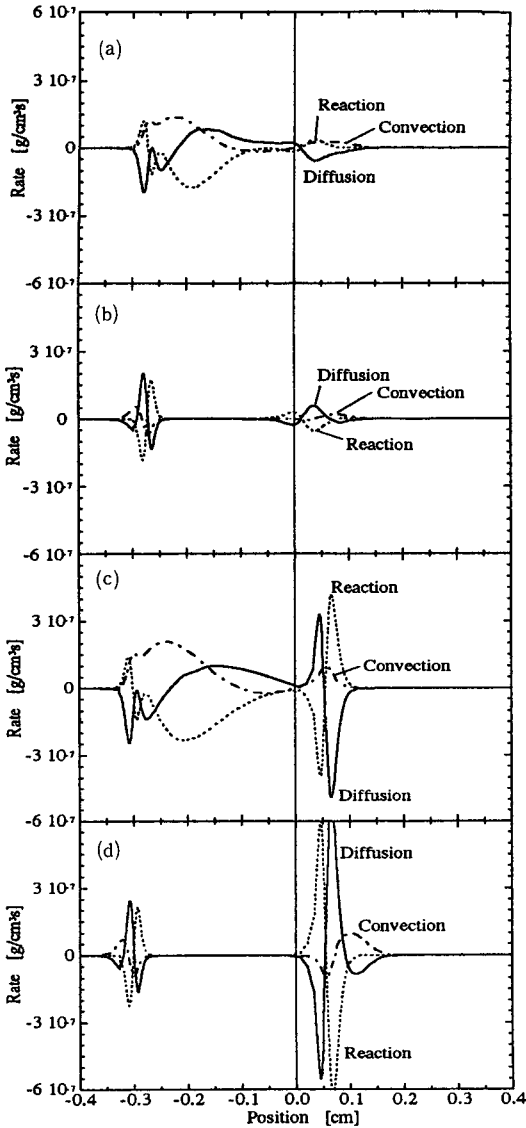


Fig. 7 Mole fraction of H, OH, NO, NO<sub>2</sub> and HO<sub>2</sub> for counter-flow flame of a=110 s<sup>-1</sup> with CH<sub>4</sub> mole fraction change

NO는 화염면과 정체점 부근에서 NO<sub>2</sub>로 변화하여 소멸됨을 알 수 있다. 이렇게 생성된 NO<sub>2</sub>는 정체점 및 화염부로 이동하여 NO로 다시 변화하므로 이 부근에서는 높은 NO의 분포를 가진다. 이와 관련되는 주요한 반응들에는 저온에서 HO<sub>2</sub>의 생성(재결합)에 중요한 H+O<sub>2</sub>+M=HO<sub>2</sub>+M 반응과 확산된 라디칼의 생성 및 소멸에 중요한 O+OH=O<sub>2</sub>+H 반응들이 있다. Fig. 8(c)와 (d)는 7%~4% 경우로서 7%~0% 경우와 비슷한 경향을 보이고 있지만, 낮은 농도의 화염에서부터 이동되는 라디칼(OH, H, O)양의 증가 및 높은 온도로 인해 훨씬 높은 NO<sub>2</sub>의 생성을 보이고 있다. 한쪽 화염의 연료 농도의 변화에 따른 NO<sub>2</sub> 배출의 양은 고온으로부터 이동되는 NO의 양, NO와 반응하여 NO<sub>2</sub>를 생성하는 HO<sub>2</sub>의 양, 생성되어 이동하는 NO<sub>2</sub>의 양, 그리고 반응할 수 있는 라디칼의 양에 의존한다고 할 수 있다. Fig. 9는 한쪽 화염의 농도 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출계수를 보여주고 있다. 농도가 줄어들수록 화염의 최대 온도가



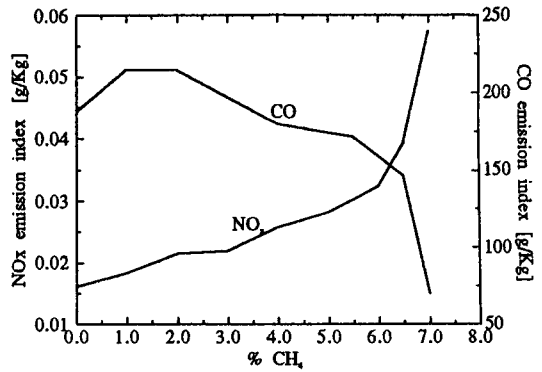
(a) NO: 7%~0% CH<sub>4</sub>  
 (b) NO<sub>2</sub>: 7%~0% CH<sub>4</sub>  
 (c) NO: 7%~7% CH<sub>4</sub>  
 (d) NO<sub>2</sub>: 7%~7% CH<sub>4</sub>

**Fig. 8** Budget of NO and NO<sub>2</sub> species for 7%~0% and 7%~4% CH<sub>4</sub> flames

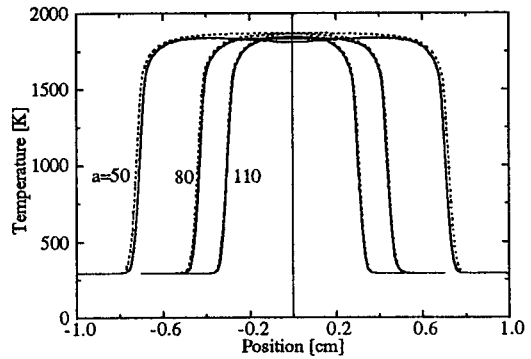
감소하므로 배출되는 NOx의 총량은 감소한다. 연소에 소요된 연료의 양이 감소함을 고려할 때 CO의 총량은 상당히 증가함을 알 수 있다.

3.2 복사열전달을 고려한 화염

Fig. 10는 복사열전달을 고려한 경우 화염의 온도분포를  $a=50, 80$  및  $110 \text{ s}^{-1}$ 에 대하여 나타낸



**Fig. 9** NO<sub>x</sub> and CO emission index for counter-flow flame of  $a=110 \text{ s}^{-1}$  with CH<sub>4</sub> mole fraction change



**Fig. 10** Temperature profiles of flame with (solid line) and without (dotted line) inclusion of gas phase radiation for  $a=50, 80$  and  $110 \text{ s}^{-1}$

것이다. 점선은 복사열전달을 고려하지 않은 경우에 대한다. 복사열전달의 영향으로 인해 화염위치는 정체점을 향하여 약간 이동하며 화염들 사이의 온도는 정체점에서 최대로 감소한다. 이런 온도의 감소는 Sohrab<sup>(9)</sup>의 실험결과와 경향이 일치한다. Fig. 11은 복사열전달을 고려한 경우의 스트레인율에 따른 최대 화염온도 및 정체점의 온도를 복사를 고려하지 않은 경우와 비교한 것이다. 스트레인율이 약  $80 \text{ s}^{-1}$  이상일 때의 최대 화염온도 및 정체점의 온도는 화염과 정체점 사이의 거리가 매우 작기 때문에 구별이 어려우며, 스트레인율이  $80 \text{ s}^{-1}$  이하인 경우는 열손실이 많아짐에 따라 정체점의 온도와 최대 화염온도는 차이를 가지며 모두 감소함을 알 수 있다. 스트레인율이 작아질수록 두 경우의 최대 화염온도 차이도 커짐을 알 수 있다. 스트레인율이 작은 경우에 온도 감소가 큰 것은 화염사이

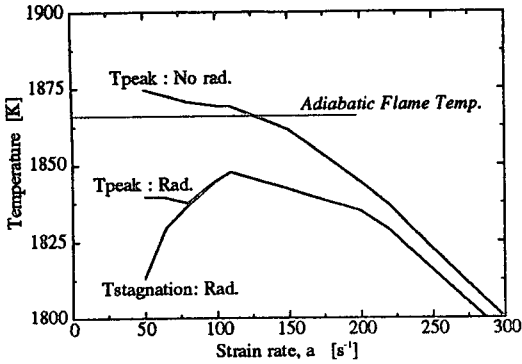


Fig. 11 Variation of peak and stagnation temperatures of flame for various strain rates with/without gas phase radiation

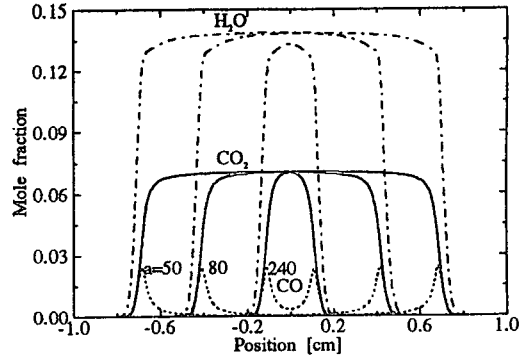


Fig. 12 Mole fraction of CO, H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> for a=50, 80 and 110 s<sup>-1</sup>

에 넓게 분포한 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>의 복사로 인한 열손실과 이에 따른 반응물의 감소 때문이고, 스트레인을 이 큰 경우에 온도 감소가 적은 이유는 화염사이 거리의 상대적 감소로 인한 복사 열손실의 감소와 CO+OH=CO<sub>2</sub>+H 등의 화학반응 등에 필요한 시간이 짧아짐에 따라 CO<sub>2</sub>의 분율이 낮아지기 때문이다. Fig. 12는 a=50, 110 및 240 s<sup>-1</sup>일 때의 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 및 CO 화학종의 분포를 각각 보이고 있다. 스트레인이 클 때 CO가 높은 몰분율을 가짐을 알 수 있다. 스트레인이 작아질수록 화염사이의 거리가 멀어져 H<sub>2</sub>O 및 CO<sub>2</sub> 몰분율에 따른 복사 열전달로 인한 열손실이 증가하며, 이로 인하여 최대 화염온도 및 정체점에서의 온도는 더욱 감소하리라 예측된다. Fig. 13은 복사열전달을 고려했을 때 CO 및 NOx의 배출계수를 나타낸다. 점선으로 나타낸 것은 복사열전달을 고려하지 않은 경우이며 실선은 복사열전달을 고려했을 경우이다. 복사열전달이 있을 때 NOx의 배출계수는 뚜렷한 감소를 나타내고 있다. 복사열전달을 고려하지 않을 때는 정체점으로 갈수록 온도가 증가하여 NOx의 생성이 활발하나, 복사를 고려할 경우 화염에서 정체점으로 갈수록 온도가 감소하므로 NOx 생성이 억제된다. 복사를 고려할 경우 스트레인율 약 250 s<sup>-1</sup> 이상에서의 NOx의 생성이 급격히 감소하며, 이는 화염 최대 온도 및 화염부의 온도가 Thermal NOx 반응이 시작된다고 알려진 1800 K 이하이기 때문이다. 스트레인이 작을수록 온도 감소폭이 커지므로 감소되는 NOx의 양이 더욱 많아짐을 알 수 있다. CO생성이 복사열전달을 고려할 때나 고려하지 않은 경우에 크게 차이를 나타내

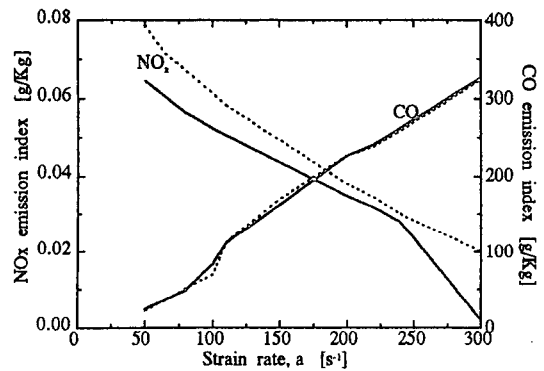


Fig. 13 NOx and COemission index with(solid line) and without(dotted line) inclusion of gas phase radiation

지 않은 것은 NOx에 비해서 상대적으로 빠른 CO<sub>2</sub>로의 반응이 화염지역에서 완료되기 때문이다.

#### 4. 결 론

상호작용하는 대향류화염에 대하여 가스 복사열전달의 영향을 고려한 수치해석 연구의 결과로 아래의 결론들을 얻었다.

(1) 서로 다른 농도의 예혼합기가 상호작용할 때 한쪽 화염의 농도가 감소할수록 화염의 최대 온도는 감소하며, 배출되는 NOx의 총량은 감소하며 CO의 양은 증가한다. 배출되는 총 NOx의 양 중에서, 농도가 감소할수록 NO<sub>2</sub>의 비율은 대칭화염에 비하여 커지고 약 4% 연료 농도를 가질 때 최대값을 가진 후 감소한다.

(2) NO<sub>2</sub> 배출량은 고온부로부터 이동되는 NO의 양, NO와 반응하여 NO<sub>2</sub>를 생성하는 HO<sub>2</sub>의



양, 생성되어 이동하는 NO<sub>2</sub>양, 그리고 반응할 수 있는 라디칼(H 또는 OH)의 양에 의존한다고 할 수 있다.

(3) 대항류화염에서 복사열전달에 의한 열손실을 고려한 경우, 복사열전달은 화염부를 생각시키며, 스트레인율이 작아짐에 따라 최대 화염온도 및 정체점을 포함한 화염사이의 온도가 감소하였다. 스트레인율이 큰 경우에는 화염들 사이의 H<sub>2</sub>O 및 CO<sub>2</sub>가 존재하는 영역이 작고, CO에서 CO<sub>2</sub>로의 반응이 충분하지 못하므로 CO<sub>2</sub>의 분율이 작아져서 복사열전달의 영향이 크게 나타나지 않았다. 미연가스쪽에서는 복사에 관여하는 화학종의 분포가 아주 작으므로 미연가스 예열 등 복사의 영향은 나타나지 않을 것이라 예측된다.

(4) 복사열전달을 고려할 경우에 화염온도가 감소하고 화염간의 온도분포가 변함에 의해, NO<sub>x</sub>의 생성이 많이 억제되는 것이 예측되었으며, 이러한 NO<sub>x</sub>의 감소는 스트레인율이 작아짐에 따라 더욱 감소한다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단(1994년 국내 Post-Doc.) 및 터보동력기계연구센터의 지원하에 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Libby, P. A. and Williams, F. A., 1980, "Fundamental Aspects," *In Turbulent Reacting Flows* (Edited by Libby, P. A. and Williams, F. A.), Springer, Berlin, pp. 1~43.
- (2) Bray, K. N. C., 1979, "The Interaction Between Turbulence and Combustion," *Seventeenth Symp. (Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 223~233.
- (3) Williams, F. A., 1975, "A Review of Some Theoretical Consideration of Turbulent Flame Structure," *AGARD Conference Proceedings*, No. 164, AGARD, Paris, pp. 1-1~25.
- (4) Chung, S. H., Kim, J. S. and Law, C. K., 1986, "Extinction of Interacting Premixed Flames: Theory and Experimental Comparison," *Twenty-first Symp. (Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1845~1851.
- (5) Law, C. K., Zhu, D. L., Zhu, T. X., Chung, S. H. and Kim, J. S., 1989, "On the Structure and Extinction Dynamics of Partially Premixed Flames: Theory and Experiment," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 64, pp. 199~232.
- (6) Chung, S. H., 1990, "Interaction of Flames," *Handbook of Heat and Mass Transfer*, N. P. Chermisinoff(Ed.), Gulf Publ. Co., Vol. 4, pp. 863~891.
- (7) Miller, J. A. and Bowman, C. T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 15, pp. 287~338.
- (8) Sohrab, S. H., Ye, Z. Y. and Law, C. K., 1984, "An Experimental Investigation on Flame Interaction and the Existence of Negative Flame Speed," *Twentieth Symp. (Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1957~1965.
- (9) Liu, G. E., Ye, Z. Y. and Sohrab, S. H., 1986, "On Radiative Cooling and Temperature Profiles of Counterflow Premixed Flames," *Combustion & Flame*, Vol. 64, pp. 193~201.
- (10) Lee, S. D. and Chung, S. H., 1994, "On the Structure and Extinction of Interacting Lean Methane/Air Premixed Flames," *Combustion & Flame*, Vol. 98, pp. 80~92.
- (11) Lee, S. D., 1993, "A Numerical Study in Interacting Lean Methane/Air Premixed Flames," Master Thesis, Seoul National University.
- (12) Giovangigli, V. and Smooke, M. D., 1987, "Calculation of Extinction Limits for Premixed Laminar Flames in a Stagnation Point Flow," *J. of Computational Physics*, Vol. 68, pp. 327~345.
- (13) Rogg, B., 1988, "Response and Flamelet Structure of Stretched Premixed Methane-Air Flames," *Combustion & Flame*, Vol. 73, pp. 45~65.
- (14) Peters, N. and Rogg, B., 1993, *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, Springer-Verlag.
- (15) Drake, M. C. and Blint, R. J., 1991, "Relative Importance of Nitric Oxide Formation Mechanisms in Laminar Opposed-Flow Diffusion

- Flames," *Combustion & Flame*, Vol. 83, pp. 185~203.
- (16) Kee, R. J., Miller, J. A., Evans, G. H. and Dixon-Lewis, G., 1988, "A Computational Model of the Structure and Extinction of Strained, Opposed Flow, Premixed Methane-Air Flames," *Twenty-Second Symp.(Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1479~1494.
- (17) Kee, R. J., Miller, J. A. and Jefferson, T. H., 1980, "CHEMKIN : A General Purpose Problem-Independent, Transportable, FORTRAN, Chemical Kinetic Program Package," *Sandia National Lab., SAND80-8003*.
- (18) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1986, "A FORTRAN Computer Code Package for the Evaluation of Gas-phase Multi-component Transport Properties," *Sandia National Lab., SAND86-8246*.
- (19) Nishioka, M., Nakagawa, S., Ishikawa, Y. and Takeno, T., 1994, "NO Emission Characteristics of Methane-Air Double Flame," *Combustion & Flame* Vol. 98, pp. 127~138.
- (20) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., 1985, "A FORTRAN Program for Modeling Steady Laminar One-dimensional Premixed Flames," *Sandia National Lab., SAND85-8240*.
- (21) Sano, T., 1984, "NO<sub>2</sub> Formation in the Mixing Region of Hot Burned Gas with Cool Air," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 38 : pp. 129~144.
- (22) Hori, M., Matsunaga, N., Malte, P. C. and Marinov, N. M., 1992, "The Effect of Low-Concentration Fuels on The Conversion of Nitric Oxide to Nitrogen Dioxide," *Twenty-fourth Symp.(Int'l) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 909~916.