

<論 文>

다공물질 연소기의 NOx 및 CO 배출 특성

임 인 권*

(1994년 9월 23일 접수)

NOx and CO Emission Characteristics of Porous Inert Medium Burner

In-Gweon Lim

Key Words : Emission Products(공해물질), Premixed Flame(예혼합화염), Porous Medium(다공물질), Burner(연소기)

Abstract

The combustion process within a porous inert medium(PIM) burner is numerically studied. A detailed chemical reaction scheme including thermal and prompt NOx reactions is used to predict the formation and destruction of pollutants such as NOx and CO. The reaction paths for NOx formation are divided to quantify the amount of NOx formed through thermal NOx reaction or through prompt NOx reaction. Emission index is calculated to compare the actual mass of NOx or CO produced through the combustion of unit mass of fuel. It is found NO formation in PIM burner is confined in flame zone and formation is suppressed due to heat loss at down-stream of the flame. Higher production of NO through prompt NO reaction path is observed due to the higher concentration of fuel derivative species and its higher diffusion at flame front. For all equivalence ratios, CO emission within PIM burner is lower than that from the one-dimensional freely-propagating flame. PIM burner flame has better NOx emission index from $\phi=0.75$ to $\phi=1.1$.

1. 서 론

연소가 다공물질 속에서 일어날 때 연소상태의 제어가 편리할 뿐만 아니라, 복사열의 효과적인 이용이란 측면에서 다공물질의 존재시 연소현상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(1~11) 여러 종류의 다공물질 중에서 세라믹 형태의 다공물질을 이용한 연구가 가장 활발하며, 세라믹 형태의 다공물질은 높은 기공률(porosity)의 스폰지 형태를 가지며 화염은 세라믹 고체 내에 안정되어 있다. 고체는 가스에 비해 훨씬 높은 방사률(emissivity)을 가지기

때문에 화염 하류면에서 고온의 다공물질에 의한 복사는 화염 상류면의 다공물질을 가열시키며, 이에 따라서 화염에 접근하는 예혼합기를 예열시킨다. 이러한 다공물질 내에서의 특이한 열재순환 기구는 화염전파속도의 증대 및 회박 혼합기의 가연한계 증대 등의 여러가지 현상들을 유발한다. 다공물질 존재시의 연소 현상 연구는 주로 화염의 안정성, 연소속도 및 연소기로부터의 복사량에 관하여 이론,^(1~3) 수치해석^(4~8) 및 실험^(9~11)을 통해 수행되어 왔다. 다공물질의 물성치를 제어함으로써 열의 재순환 및 열전달량을 조절할 수 있고 이에 따라 화염 안정성을 증대시킬 수 있으며,^(3,5-6) 또한 다공물질의 열용량이 크므로 외부의 교란에 민감하지 않고 정상적으로 많은 양의 혼합기를 연소시킬 수

*정회원, 서울대학교 터보동력기계연구센터

있다. 또한 이 연소방식은 초과 엔탈피현상⁽¹²⁾에 의하므로 화염온도가 이론적으로 얻을 수 있는 단열화염온도보다 높아지며, 이에 따른 화학 반응물의 증가로 인하여 저발열량 연료의 연소 및 폐기물 소각시 사용이 적합하다고 할 수 있다. 일반적인 연소 방식에 비해서 연소율이 크므로, 일산화탄소(CO)의 배출이 억제되며 또한 같은 열량에 대해서 연소기 체적을 감소시킬 수 있다. 이에 따라 고온에서의 체류시간에 비례하여 생성되는 질소산화물(NOx; NO, NO₂ 및 N₂O)의 양도 감소된다.

다공물질 속에서의 연소에 대한 여러 연구가 활발하지만 연소기에서의 공해물질 배출에 대한 연구는 미미한 편이다. 본 연구에서는 연소가 다공물질 속에서 진행되고 있을 때 화염 구조의 변화 및 독특한 열재순환 기구에 따른 NOx와 CO의 생성 및 소멸 특성을 알아보려고 한다. thermal NOx 및 prompt NOx 반응을 포함하는 C2 반응 메카니즘(Reaction mechanism)을 사용하여 생성되는 NOx의 반응 경로를 밝히고, 다른 화염(일차원 자유전파 층류화염)과 비교하여 실제로 NOx가 얼마나 감소하는가를 밝히고자 한다. 이를 위하여 실제 반응한 연료량에 대한 배출물의 양의 비율 이용한 CO 및 NOx의 배출계수⁽¹³⁾(EI: emission index)가 산출되었으며 이를 다른 화염과 비교하였다.

2. 모델 및 화학반응

연소가 다공물질 속에서 진행될 때 화염구조 해석 및 화학종의 생성과 소멸을 연구하기 위해서 일차원 자유전파 층류화염(one-dimensional freely-propagating laminar flame) 수치해석 모델^(14,15)을 수정하여 사용하였다. 일차원 자유전파 층류화염 모델에 대한 연구는 널리 알려져 있으므로 여기서는 생략한다. 다공물질에서 연소 모델은 예혼합된 혼합기가 일정 길이의 실린더 형태의 다공물질로 만들어진 연소기를 통과하며, 화염이 연소기 내에서 고정, 안정화된 것을 대상으로 개발되었다. 모델에 사용된 가정 및 지배방정식, 경계 조건 및 해석 방법에 대해서는 Sathe,⁽⁶⁾ Hsu⁽⁴⁾ 및 Lim^(5,6) 등에 있으므로, 이에 대한 자세한 사항은 생략한다. 일차원 자유전파 층류화염 모델에서 수정된 지배방정식은 기체 및 고체상의 에너지방정식이며 이들은 다음과 같다.

기체상의 에너지방정식

$$\begin{aligned} & \rho u C_p A_g \frac{dT}{dx} - A_g \frac{d}{dx} (\lambda_g T_g) \\ & + A_g \sum_{k=1}^K \rho V_k V_k C_{pk} \frac{dT_g}{dx} + A_g \sum_{k=1}^K h_k \dot{\omega}_k W_k \\ & + A_s H (T_g - T_s) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

고체상의 에너지방정식

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} (\lambda_{s,pure} A_{s,eff} \frac{dT_s}{dx} + A_s H (T_g - T_s) \\ & - \frac{d}{dx} (A_{au} q_r) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

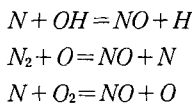
여기서, x 는 화염에 고정된 공간좌표, u 는 유체 혼합물의 속도, T 는 온도, Y_k , W_k , $\dot{\omega}_k$ 는 각각 k -화학종의 질량분율, 분자량, 단위 체적당 몰생성을 이며, ρ 는 질량밀도, W 는 화합물의 평균 분자량, c_p 는 혼합기체의 정압비열, C_{pk} 는 k -화학종의 정압비열, K 는 화학종의 수, h_k 는 k -화학종의 총엔탈피이며, V_k 는 k -화학종의 확산 속도로서 열확산을 고려한 fickian 관계를 이용하여 구해진다. 식에서 사용된 아래첨자 all , g 와 s 는 각각 가스상과 고체상의 합, 가스상, 고체상을 의미한다. H 는 대류열 전달 계수와 다공물질 단위 체적당 셀의 개수의 곱으로 나타나며, H 가 무한대일 경우 가스상 및 고체상의 온도가 같으며⁽⁴⁾, $\lambda_{s,pure}$ 및 $A_{s,eff}$ 는 다공물질을 구성하는 재료의 열전도율 및 다공물질에서의 실제 열전도도가 되는 면적을 나타낸다. 식(2)에서 복사열전달 항의 모델에는 흡수, 발산 및 산란하는 물질에 대한 일차원 복사전달 방정식이 사용되었으며 이에 대한 내용은 Tan⁽¹⁶⁾ 및 Tan과 Howell⁽¹⁷⁾에 있으므로 여기서는 생략한다.

화염에서 질소산화물의 생성 및 소멸을 알아보기 위해서 C2까지의 상세 반응을 고려하고 질소산화물 반응을 포함한 51개의 화학종 및 235개의 화학 반응 단계를 가지는 반응 메카니즘⁽¹⁸⁾을 사용하였다. 이 반응 메카니즘은 메탄과 공기의 예혼합 화염에 대하여 당량비가 약 1.3까지는 화염전파속도 및 단열화염온도의 예측이 실험결과들과 잘 일치하며⁽⁵⁾, 이 반응 메카니즘을 화염 구조 및 질소산화물의 생성 연구에 사용한 예는 많다.^(13,19) NOx의 생성 경로를 알기 위하여 전체 반응 메카니즘(full mechanism)에서 prompt NOx 및 다른 경로를 통한 질소산화물의 반응을 제외한, thermal NOx 반응 경로만을 가지는 37개의 화학종 및 153개의 반응단계로 구성되는 thermal 메카니즘을 만들었다. 본 연구에 이용된 두 가지 메카니즘들을 구성하는

화학종들은 Table 1에 나타나 있다.

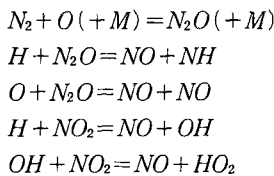
질소성분을 포함하지 않는 연료의 연소시 대기중의 질소 분자의 산화에 의한 thermal NOx와 화염면에서 연료로부터 생겨난 radical과 질소의 반응에 의한 prompt NOx가 주요한 NOx의 생성 경로로 알려져 있다.^(19,20) NOx의 총 배출량중에서 NO₂와 N₂O의 비율은 작다고 알려져 있으므로⁽²¹⁾ NOx에 대한 주 연구는 NO에 대하여, 일반적으로 널리 알려진 NO의 생성경로는 다음과 같이 나누어 진다.^(19,21)

(1) 산소농도 평형상태의 확장된 Zeldovich's NO 생성

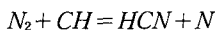


(2) 산소농도 초과상태의 확장된 Zeldovich's NO 생성

(3) N₂O 중간 생성물 및 NO₂를 통한 NO 생성



(4) Fenimore에 의해서 제안된 prompt NO 생성



Zeldovich's NO 생성반응들의 반응률 등은 넓은 온도 범위에 걸쳐서 잘 알려져 있으며, 이 중에서 반응제한 단계(rate limiting step)인 N₂ + O = NO + N의 반응이 늦다는 점을 이용하여 NO생성률에

대한 간단한 식을 산소 농도가 평형이라는 가정하에서 유도할 수 있다.⁽²²⁾ Drake and Blint⁽²¹⁾는 상대적으로 느린 radical의 재결합 반응으로 인해서 산소가 평형상태의 농도를 훨씬 초과하는 것을 밝혀냈으며, 이로 인한 화염면에서 아주 높은 농도의 NO를 찾아내었다. 이 때문에 NO 생성 및 소멸 경로를 밝힐수 있기 위해서는 radical의 재결합 반응을 정확히 기술할 수 있는 연료의 산화 반응 메카니즘이 필요하다고 알려져 있다.^(18,21) 근래에 확산화염의 연구로부터 그 중요성이 다시 인식되는 prompt NO는 연료로부터 생겨난 CH같은 Radical이 화염 전면에서 질소와 반응을 일으켜 생성되며, 본 연구의 화염에서는 N₂O 및 NO₂의 생성이 미소하므로 전체 NOx 생성량중 Thermal NOx 양을 빼 것을 prompt NO의 양으로 고려하였다. 일반적으로 메탄을 연료로 하는 화염에서의 CO의 생성 및 소멸경로는 간단하므로 잘 이해되고 있다. CO는 화염 근처에서 평형 농도의 값을 초과하며 충분한 산소 및 체류시간이 제공되면 주로 CO + OH = CO₂ + H 반응에 의해서 CO₂로 변환된다.⁽²²⁾ 이 반응은 온도 및 연소 가스의 냉각률에 의존하므로 화염 후방에서 열손실이 있는 본 연구의 화염에서 CO의 배출 특성에 영향을 미칠 수도 있다.

모델에 사용된 화학종들의 열역학적 상태량 및 전달물성치는 Chemkin⁽²³⁾과 Tranfit⁽²⁴⁾으로부터 구해지며 이들은 기체상의 온도, 압력 및 화학 조성에 의존한다. 계산은 최적상태로 Vectorized된 상태에서 IBM RISC system/6000에서 행해졌으며, 적응격자방법(adaptive gridding method)을 이용하였다. 화염전파속도 및 화염의 최대 온도가 변화하지 않기 위해서는 약 150~200개의 격자가 필요하

Table 1 The species considered in NOx reaction mechanisms

Thermal mechanism							
CH ₄	CH ₃	CH ₂	CH	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂
CO	NO	H ₂	OH	H	O	N	C
HO ₂	C ₄ H ₃	C ₄ H ₂	C ₃ H ₃	C ₃ H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₅	C ₂ H ₄
C ₂ H ₃	C ₂ H ₂	C ₂ H	CH ₂ (S)	CH ₂ CO	HCCOH	HCCO	CH ₃ O
CH ₂ OH	CH ₂ O	HCO	H ₂ O ₂				
Full mechanism							
Species considered in Thermal mechanism plus							
HCN	HCNO	HNCO	HOCN	H ₂ CN	HNO	NCO	CN
NNH	NH ₃	NH ₂	NH	NO ₂	N ₂ O	C ₂ N ₂	

Table 2 The properties of ceramic matrix used in the model

Heat transfer coefficient, H	10 ⁷ W/m ³ -K
Solid thermal conductivity, λ _s	2.2 W/m-K
Porosity	0.87 for 10 PPI* PSZ**
Effective area for conduction	0.07/unit area
Scattering albedo	0.8
Extinction coefficient	270.0 1/m
Exit radiation B. C.	Solid temperature at exit

* -pores per inch

** -partially stabilized Zirconia

며 계산 시간은 30분에서 수 시간을 필요로 한다. 다공물질의 존재시 화염구조가 일차원 자유전과 층류화염과는 판이하므로 두 화염의 비교를 위해서 온도 구배가 최대가 되는 점화점⁽²⁴⁾을 $x=0.0$ 로 하여 두 화염의 점화점이 일치하도록 하였다. 본 연구에서 모델된 혼합기는 메탄과 공기로 조성되었고 연소기 입구에서 온도 298.0 K로 유입된다. 연소기의 압력은 1기압으로 유지되며 연소기의 길이, 즉 계산영역 ($-L < x < +L$)은 12.0 cm이다. 계산에 이용된 다공물질의 물성치 등은 Table 2에 나타나 있다. 물성치 및 다른 인자들이 계산 결과에 미치는 영향은 Lim⁽⁵⁾에 나타나 있다. 모든 경우의 계산은 두 가지 반응 메카니즘에 대해서 각각 행하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 당량비(ϕ)에 따른 화염 특성

Fig. 1은 다공물질에서 연소시의 연소속도, 최대 화염온도 및 연소기 출구의 온도를 일차원 자유전과 층류화염과 비교하여 보여주고 있다. 연소기의 유동면적이 다르므로 비교를 위해서 다공물질에 대한 연소속도는 단위 면적으로 환산된 결과를 나타내었다. 본 연구에서 모델된 다공물질 속에서 연소가 일어날 때는 연소속도가 모든 당량비에 대하여 일차원 자유전과 층류화염의 연소속도보다 훨씬 커지는 것을 알 수 있으며, 연소시 화염의 최대 온도도 단일화염온도를 초과한다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 알려져 있는 메탄과 공기의 희박 예혼합 화염의 가연한계인 당량비⁽²⁶⁾ 0.5보다 훨씬 낮은 당량비에서도 상당한 화염전파속도를 가짐을 알

수 있다. 연소기 출구의 온도는 최대 화염온도에서 거의 일정하게 감소된 값을 가진다. 일반적으로 화염의 연소속도는 온도에 아주 민감하고 Radical의 생성을 지배하는 $O + OH = O_2 + H$ 반응과 $CO + OH = CO_2 + H$ 반응에 의존하고, H 또는 OH 등의 radical들의 농도 및 radical들의 확산에 민감하다고 sensitivity 해석을 통하여 알려져 있다.⁽²⁷⁾

Fig. 2(a), (b) 및 (c)는 당량비가 $\phi=0.7, 1.0$ 및 1.3일 때의 화염 부근의 온도 및 주요한 화학종의 분포를 일차원 자유전과 층류화염과 비교하여 나타내었다. Fig. 2(d), (e), (f)는 H와 OH radical들의 분포를 나타낸다. 점선으로 나타난 것은 일차원 자유전과 층류화염에 대하여, 실선으로 나타난 것들은 다공물질 연소에 대한다. 일차원 자유전과 층류화염에 비해서 온도의 최대점이 빨리 나타남을 알

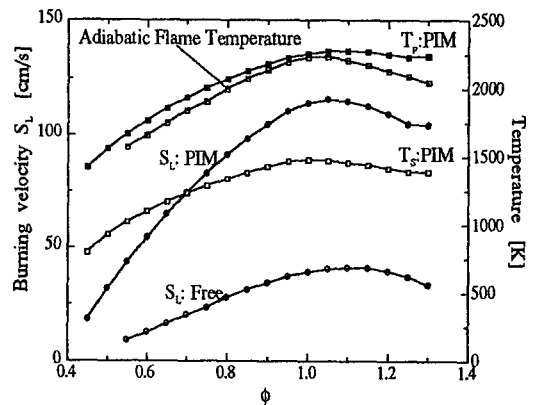


Fig. 1 Burning velocity(S_L), peak flame temperature(T_p) and exit solid temperature(T_s) of one-dimensional freely propagating laminar (Free) flame and inert medium(PIM) flame

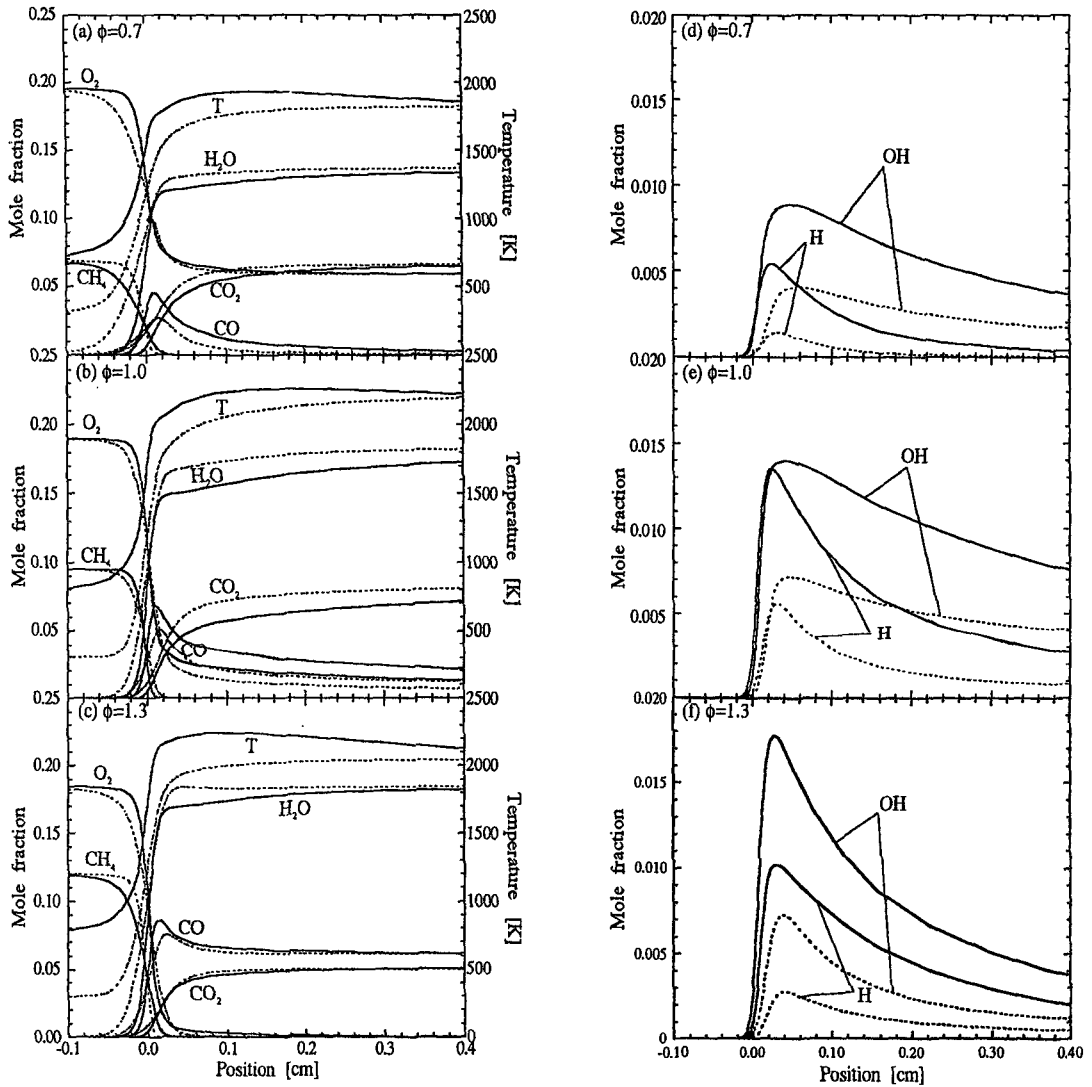


Fig. 2 Temperature and major species profiles near flame of Free flame and PIM burner flame (a) $\phi=0.7$, (b) $\phi=1.0$, (c) $\phi=1.3$; H and OH species profiles near flame of free flame and PIM flame (d) $\phi=0.7$, (e) $\phi=1.0$, (f) $\phi=1.3$ (dot lines : free flame, solid lines : PIM flame)

수 있고, 화학 반응이 일어나는 영역(화염 두께)이 자유전과 층류화염에 비해서 훨씬 좁음을 알 수 있다. 화염근처에서 radical들의 확산속도는 Radical 농도 구배 및 온도 구배에 의존한다. 다공물질에서 화염전파속도 증가는 화염부에서 H와 OH radical들의 높은 농도, 이의 급한 기울기 및 높아진 화염 온도에 따른 반응물의 증가에 기인한다고 할 수 있다. 위와 같이 자유전과 층류화염에 비해서 전혀 다른 화염의 구조를 가지는 다공물질 속에서의 화염은 또한 자유전과 층류화염과는 다른 연소 배출

물의 특성을 가진다. 이에 대한 것은 다음에서 다룬다.

3.2 NOx 및 CO의 배출 특성

생성되어 배출되는 NOx 중에서 NO₂ 및 N₂O가 차지하는 비율이 NO의 비율에 비하여 상대적으로 작으므로 여기서는 NO의 배출 특성에 대해서만 언급한다. Fig. 3은 당량비에 따른 연소기 출구에서 NO 및 CO의 배출을 일차원 자유전과 층류화염과 비교하여 나타내고 있다. NO의 배출에 대해

서 thermal NO 및 prompt NO의 생성경로에 따른 배출을 각각 나타내었다. 전체 NO의 배출은 당량비가 약 0.75 이하 또는 1.1 이상인 경우를 제외하고는 일차원 자유전파 층류화염보다 적으며 특히 당량비 1.0 근처에서는 아주 큰 감소를 보이고 있다. 이런 NO의 배출 감소는 연소속도 증가에 따른 연소 가스의 고온부에서 체류시간 감소와 화염의 바로 후반부에서 복사열전달 및 전도열전달에 의한 열손실에 기인한다. 화염 부근에서 생성된 prompt NO의 양은 일차원 자유전파 층류화염보다 대부분의 당량비에서 많으며 혼합기가 진행할수록 이의 비율이 커지며, 당량비 1.3의 진한 경우는 배출되는 NO의 약 50% 정도까지 차지한다. 이는 진한 혼합기에서는 CH 등의 radical 생성이 많으며, 이의 농도구배가 크기 때문이다. 희박 혼합기에서 일차원 자유전파 층류화염보다 많은 thermal NO의 생성은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 화염 최대 온도의 증가 때문이다. Fig. 4는 $\phi=0.7, 1.0$ 및 1.3일때 화염 부근에서 NO 및 질소산화물 반응에 관련된 화학종의 분포를 보이고 있다. 점선으로 표시된 NO는 thermal NO 반응만을 이용하여 얻어진 것을 나타낸다. 전체반응 사용시 thermal NO 반응 시작전에 이미 NO₂, N₂O 및 HCN의 생성에 관련하는 반응이 시작됨을 알 수 있다. 진한 혼합기에서 HCN의 농도가 더욱 높아지며 이의 구배가 더 심해짐을 알 수 있으며, 이로부터 혼합기가 진행할수록 높은 prompt NOx의 생성을 이해할 수 있다. 화염부에서 NO는 빠르게 평형 상태에 근접하며 연소기에서 화염 하류의 온도가 감소하는

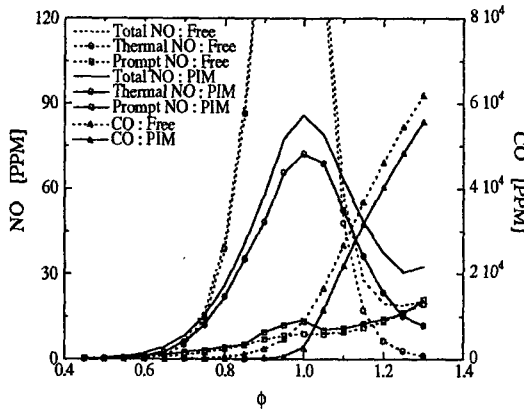


Fig. 3 NOx and CO emission from Free flame and PIM flame (dot lines: free flame, solid lines: PIM flame)

점을 고려하면 다공물질 연소기에서의 NO 생성은 거의 모두 화염근처에서 이루어진다는 것을 알 수 있다. 모든 당량비에서 CO의 배출은 일차원 자유전파 층류화염보다 적게 나타난다. Fig. 2와 같이 CO는 일차원 자유전파 층류화염보다 훨씬 높은 농도로 화염 부근에서 평형상태를 초과하여 생성되나, 상대적으로 고온인 상태에서 높은 농도의 CO 및 OH radical이 분포하는 화염하류에서 $CO + OH = CO_2 + H$ 반응에 의해서 빠르게 감소하여 결국 연소기 출구에서는 일차원 자유전파 층류화염

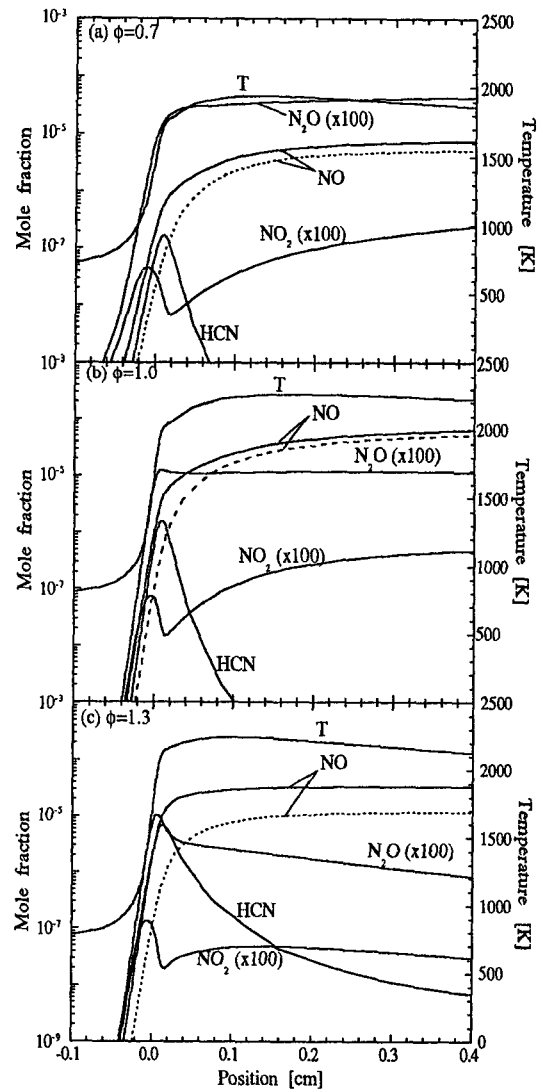


Fig. 4 NO and other species profiles to NOx reactions (dot lines: free flame, solid lines: PIM flame)

에 비하여 적은 양이 배출된다.

이상에서 다공물질에서의 NO 및 CO의 배출 특성은 일차원 자유전과 층류화염과 비교되었다. 그렇지만 화염전파속도, 체류시간 및 온도 분포 등의 구조가 다른 화염들에서의 배출물의 비교는 엄밀한 의미에서 적당하지 못하다. Lim⁽⁶⁾은 다공물질 연소기에서의 연소 후 체류시간에 대한 화염구조 및 공해물질 배출에 대해서 정성적으로 연구하였으나 배출 특성이 얼마나 좋아지는가는 정량적으로 밝히지 못하였다. 최근 Nishioka 등⁽¹³⁾은 서로 다른 화염구조의 화염들에서 배출되는 배출물의 양을 정량적으로 비교하기 위해서 배출계수(emission index)를 사용하였다. 이는 연소된 연료의 양에 대한 생성된 화학종의 질량비로 나타내며, NOx 및 CO의 배출계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$EI_{CO} = \frac{\int_{-L}^L W_{CO} \dot{\omega}_{CO} dx}{\int_{-L}^L W_{CH_4} \dot{\omega}_{CH_4} dx} \quad (3)$$

Fig. 5에는 이에 따른 배출계수를 NOx 및 CO에 대하여 일차원 자유전과 층류화염과 비교하였다. 다공물질 연소기는 NOx에 대해서는 당량비 1.1 이하에서, CO에 대해서는 모든 당량비에서 일차원 자유전과 층류화염에 비해 훨씬 좋은 배출 특성을 가짐을 알 수 있다.

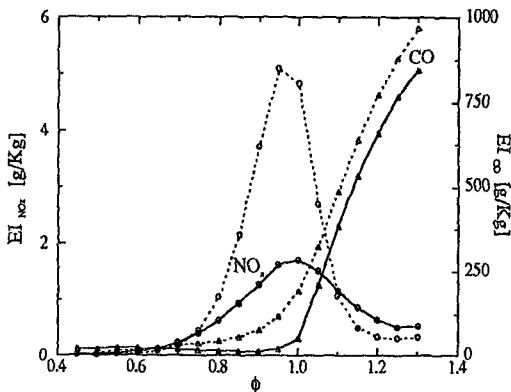


Fig. 5 Emission index of NOx and CO from Free flame and PIM flame (dot lines: free flame, solid lines: PIM flame)

4. 결 론

연소가 다공물질 속에서 일어날 때 화염구조 해석 및 공해 배출물의 특성을 알아보기 위해서 수치 해석 모델에 질소산화물 반응을 포함한 수치해석 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 다공물질에서의 연소시 화염의 구조는 일차원 자유전과 층류화염과는 다르며 연구에서 모델된 다공물질 연소기의 경우 증가된 화염전파속도와 단일화염온도보다 높은 화염온도를 가지는 화염이 존재한다.

(2) 다공물질에서의 연소시 화염전파속도의 증가는 radical의 농도분포 및 화염온도의 증가로부터 설명할 수 있으며, 이런 화염 구조의 변화는 연소 배출물 특성에 뚜렷한 영향을 끼친다.

(3) 다공물질에서의 연소시 모든 당량비에서 CO의 배출은 일차원 자유전과 층류화염에 비하여 적으며 이는 최대 화염온도의 증가 및 OH radical 분포의 증가에 기인한다.

(4) 다공물질에서의 연소시 NO의 배출은 당량비가 약 0.75부터 1.1까지는 일차원 자유전과 층류화염에 비하여 훨씬 좋은 배출 특성을 가진다. 대부분의 NO는 화염부에서 생성되며 연소기의 화염 하류에서는 열손실에 의하여 thermal NO의 생성이 억제된다.

(5) 연소에 사용된 연료의 양에 대한 NOx 및 CO 배출계수는 다공물질에서의 연소시 공해물질 배출 특성은 당량비 약 0.8 이상 1.1 이하에서만 일차원 자유전과 층류화염에 비하여 우수한 것을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 1994년도 한국과학재단(국내 Post-Doc.)의 지원으로 서울대학교 터보동력기계 연구센터에서 연수 중에 수행되었으며, 한국과학재단 및 터보동력기계연구센터 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) McIntosh, A. C. and Prothero, A., 1991, "Model of Large Heat Transfer Surface Combustion

- With Radiant Heat Emission," *Combustion and Flame*, Vol. 83, pp. 111~126.
- (2) Andersen, F., 1992, "Heat Transport Model for Fiber Burners," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 18 pp. 1~12.
 - (3) Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K. and Tomimura, T., 1986, "Analytical and Experimental Studies on Radiation Propagation in Porous Media with Internal Heat Generation," *Proceedings of the Eighth International Heat Transfer Conference*, 827.
 - (4) Hsu, P.-F., Howell, J. R. and Matthews, R. D., 1991, "Numerical Investigation of Premixed Combustion within Porous Inert Media," *Proceedings ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.* 4, pp. 225~231.
 - (5) Lim, I. G., 1992, "A Numerical Study of Combustion within a Porous Inert Medium Burner," Ph. D. Dissertation, Mechanical Engineering Dept., The Univ. of Texas at Austin.
 - (6) Lim, I. G. and Matthews, R. D., 1993, "Predictions of NO_x and CO Emissions from Porous Medium Burner," *In Emerging Energy Technology*, (S. R. Gollahalli, editor), *ASME Publication PD-Vol. 50*, pp. 77~84.
 - (7) Baek, S. W., 1989, "The Premixed Flame in a Radiatively Active Porous Medium," *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 64, pp. 277~287.
 - (8) Sathe, S. B., Peck, R. E. and Tong, T. W., 1989, "Numerical Analysis of Combustion and Heat Transfer in Porous Radiant Burners," '89 *National Heat Transfer Conference, ASME HTD* : 461~468.
 - (9) Sathe, S. B., Kulkarni, M. R., Peck, R. E. and Tong, T. W., 1989, "An Experimental Analysis of Combustion and Heat Transfer in Porous Radiant Burner," '89 *Fall Meeting of the Western States Sections of the Combustion Institute*.
 - (10) Min, D.-K. and Shin, H.-D., 1991, "Laminar Premixed Flame Stabilized Inside a Honeycomb Ceramic," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No.2, pp. 34(2) : 341~356.
 - (11) Kendall, R. M. and DesJardin, S. T., 1989, "Basic Research on Radiant Burners," *Gas Research Institute Annual Report*, GRI-89/0212.
 - (12) Hardesty, D. R. and Weinberg, F. J., 1976, "Converter Efficiency in Burner Systems Producing large Excess Enthalpies," *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 12, pp. 153~157.
 - (13) 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.
 - (14) Smooke, M. D., Miller, J. A. and Kee, R. J., 1983, "Determination of Adiabatic Flame Speeds by Boundary Value Methods," *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 34, pp. 79~90.
 - (15) 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*.
 - (16) Tan, Z., 1989, "Radiative Heat Transfer in Multidimensional Emitting, Absorbing and Anisotropic Scattering Media-Mathematical Formulation and Numerical Method," *J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 141~147.
 - (17) Tan, Z. and Howell, J. R., 1990, "A New Numerical Method for Radiation Heat Transfer in Nonhomogeneous Participating Media," *AIAA, J. Thermophysics* 4(4) : 419.
 - (18) 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.
 - (19) Correa, S. M. and Smooke, M. D., 1990, "NO_x in Parametrically Varied Methane Flames," *The 23rd Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 289~295.
 - (20) Fenimore, C. P., 1971, "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames," *The 13th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 373~380.
 - (21) Drake, M. C. and Blint, R. J., 1991, "Calculation of NO_x Formation Pathways in Propagating Laminar, High Pressure Premixed CH₄/Air Flames," *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 75, pp. 261~285.

- (22) Bowman, C. T., 1975, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 1, pp. 33~45.
- (23) Kee, R. J., Miller, J. A. and Jefferson, T. H., 1980, "CHEMKIN : A General Purpose Problem-Independent, Transportable, FORTRAN, Chemical Kinetic Program Packages," *Sandia National Lab., SAND80-8003*.
- (24) 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*.
- (25) Weber, R. O., 1989, "Thermal Theory for Determining the Burning Velocity of a Laminar Flame, Using the Inflection Point in the Temperature Profile," *Combustion Sci. and Tech*, Vol. 64, pp. 135~139.
- (26) Blint, R. J., 1988, "Flammability Limits for Exhaust Gas Diluted Flames," *The 22nd Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1547~1554.
- (27) Coffee, T. P. and Heimerl, J. M., 1983, "Sensitivity Analysis for Premixed, Laminar, Steady State Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 50 pp. 323~340.