

비단열 화염편 모델을 이용한 Mild Combustor의 연소특성 해석

김 군 흥¹⁾ · 김 용 모^{*1)} · 안 국 영²⁾

한양대학교 기계공학부¹⁾ · 한국기계연구원 환경기계기술연구부²⁾

A Study on Characteristics of Mild Combustion using the Radiative Flamelet Model

Gunhong Kim¹⁾ · Yongmo Kim^{*1)} · Kookyong Ahn²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Eco-machinery Engineering Department, Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM), 171 Jang dong, Yuseong gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 22 July 2004 / Accepted 12 November 2004)

Abstract : Mild combustion or Flameless oxidation(FLOX) have been considered as one of the most prospective clean-combustion technologies to meet both the targets of high process efficiency and low pollutant emissions. A mild combustor with high air preheating and strong internal exhaust gas recirculation is characterized by relatively low flame temperature, low NOx emissions, no visible flame and no sound. In this study, the Steady Flamelet Approach has been applied to numerically analyze the combustion processes and NOx formation in the mild combustor. The detailed discussion has been made for the basic characteristics of mild combustor, numerical results and limitation of the present combustion modeling

Key words : Mild combustion, Steady flamelet model(층류 화염편 모델), Radiative finite-volume-method model (유한 체적법 복사모델)

1. 서론

실제 연소장치들에 대한 오염물질 저감기술은 연소연구에 있어서 주요 과제이다. 주요 오염 물질중 하나인 NOx를 줄이기 위한 많은 연소기술들이 제안되어 왔다. 일반적인 저 NOx 연소기술들은 고 산소 농도 영역과 고온의 영역내의 체류시간을 줄임으로써 열적 질소산화물의 발생을 억제시키는 연소 기술들이다. 그러나 화염안정성과 설계 및 개발에 있어서의 고비용과 긴 개발기간으로 인해 어려움이 있다. 연소장치의 설계와 운전에서 또 다른 주

요 문제는 연소효율이다. 연소효율을 높이는 방법으로 가장 잘 알려진 기술은 배기가스를 이용하여 연소공기를 예열시키는 것이다. 그러나 이러한 연소방법은 예열정도에 따라 화염온도의 상승을 가져 오고 따라서 열적 질소산화물 발생을 촉진시키는 결과를 가져오게 한다. 이처럼 대부분의 일반적인 연소기술들은 연소효율과 오염물질 억제에 있어서 상반되는 경향을 극복하기에 어려움이 있다.

지난 십여 년 동안의 많은 연구결과들과 산업체 적용사례들에 따르면 flameless oxidation 또는 Mild 연소가 고효율성과 저 오염물질 배출을 동시에 만족시키는 가장 유망한 연소기술로 인식되고 있다.¹⁻³⁾ Wunning은 열적 질소산화물의 발생을 억제하

*To whom correspondence should be addressed.
ymkim@hanyang.ac.kr

기 위하여 연소기내에 강한 배기가스 재순환 영역을 형성시켜 연료와 공기 혼합을 희석시킴으로써 낮은 화염온도에서 안정적으로 연소반응이 유지되는 flameless oxidation(이하 Mild 연소) 연소기술을 소개하였다.¹⁾ 강한 배기가스 재순환의 존재로 인하여 연소공기를 높은 온도로 예열시키는 경우에도 연소기내의 화염온도가 억제되어 고효율과 오염물질 저감을 동시에 만족시킬 수 있었다. 그리고 실험과 수치해석을 통하여 mild 연소현상은 일반적인 안정화된 화염장과 다른 연소특성을 보이며 완화된 화염 온도변동과 감소된 NOx와 소음 방출특성을 확인하였다.

Plessing⁴⁾은 mild 연소기 실험을 통하여 반응영역내의 반응물의 반응온도를 자발화 온도이상으로 상승시키는 것은 연소공기의 예열보다는 주로 강한 배기가스 내부 재순환에 의해서 이루어지며, 이에 희석된 연소공기내의 낮은 O₂ 농도에도 연소현상이 발생하게 되는 것이 mild 연소의 기본 특성임을 확인하였다. mild 연소현상이 안정적으로 발생하기 위해서는 800°C이상의 연소실 온도와 강한 배기가스 재순환이 요구됨을 실험적으로 밝혔다. Katsuki²⁾의 연구결과에 따르면 희석된 반응물내의 낮은 O₂농도에서 연소현상이 발생하기 위해서는 자발화가 발생할 수 있는 800°C이상의 연소반응온도가 유지되어야 함을 확인하였다. 예를 들면 실제 희석된 공기 내에 3%이하의 산소농도가 존재할 때에도 1200K까지 예열될 경우 연소반응이 안정적으로 유지될 수 있다.

Mild연소기내의 OH 라디칼과 온도장에 대한 Plessing의 레이저 계측결과들로부터 mild 연소는 well stirred reactor 영역에서 발생함을 확인하였다.⁴⁾ 이론적으로 mild 연소는 반응 영역 내에서 재순환 영역으로 유입되는 배기가스에 의해 상승된 반응물의 온도와 연소반응 후 온도의 차가 크지 않으며, 연료와 공기가 배기가스에 희석되어 화학반응 시간이 상대적으로 증가하게 되어 낮은 Da 수의 특성을 보이게 된다. Plessing의 실험 및 수치적 연구결과는 mild 연소 현상은 well-stirred reactor 영역에서 발생하고 있으며 900K~1400K까지의 반응물 예열온도에 따른 연소온도의 차가 200K~400K 사이에 있음을 확인하였다.⁴⁾ 이러한 mild 연소 특성으로 인해 일

반적인 Da 수와 온도의 관계인 S 형태의 곡선은 다른 단조로운 형태로 나타나게 되며 소염현상이 거의 나타나지 않게 된다. 이러한 낮은 Da 수의 특성은 Tabacco⁵⁾의 경우에서도 언급되었으며 mild 연소의 가장 기본적이고 중요한 특성으로 알려져 있다.

NOx 생성 특성은 mild 연소기 내의 상대적으로 낮은 1800K 이하의 연소온도분포로 인해 열적 질소산화물의 생성이 상당부분 억제되고 있음은 널리 알려져 있다. 화염 온도의 변동이 열적 질소산화물 생성을 증가시킬 수 있으나 Plessing의 연구에서처럼 well-stirred reactor 영역에서의 mild 연소는 이러한 온도 변동이 완화되며 이는 일반적인 화염장의 경우와 비교한 Wunng의 실험결과를 보면 mild 연소의 경우가 온도 변동이 작은 것을 알 수 있다.¹⁾ Tabacco는 상대적으로 온도에 둔감한 NOx 생성 메카니즘의 중요성을 제기하였으며 이에 대한 배기가스 성분의 영향을 해석을 수행하였다.⁵⁾

재순환 영역이 존재로 인해 mild 연소기는 긴 체류시간과 H₂O와 CO₂에 의한 복사 열전달이 종래의 연소기에서 보다 증가됨을 많은 연구자들에 의해 실험적으로 확인되었으며^{1,3)} Tabacco는 수치해석을 통해 복사 영향이 mild 연소 현상에 매우 중요함을 보여주었다.⁵⁾ 강한 배기가스 재순환으로 인해 느린 화학 반응율과 반응 영역내에 CO₂와 H₂O의 농도증가로 인하여 다른 연소기에서 보다 고온의 반응영역내에서 많은 복사 열손실을 발생함을 확인하였다.⁵⁾

이상에서 살펴본 바와 같이 mild 연소현상에 대한 수치해석을 수행하기 위해서는 낮은 Da 수로 인한 비평형 화학반응을 고려할 수 있는 연소모델, 난류 혼합모델, 복사 열전달 모델이 요구되어지며, 특히 NOx 생성특성을 살펴보기 위하여 상세 NOx 생성 반응기구를 고려할 수 있는 예측모델이 요구됨을 확인할 수 있다.

본격적인 mild 연소기에 대한 수치해석은 Tabacco와 Coelho에 의해 수행되었다.^{5,6)} Tabacco는 상세 NOx 화학반응의 중요성에 대해 언급하였지만 실제 수치해석 모델의 한계로 인해 이를 고려하지 못하였다. Coelho는 well-stirred reactor 영역의 mild 연소현상에 대하여 화염편 모델의 적용 가능성을 확인하였다. 특히 상세 화학반응을 고려한 비정상

화염편 모델인 EPFM(Eulerian Particle Flamelet Model)을 이용하여 NOx 생성특성을 성공적으로 해석하였다. Coelho의 해석결과로부터 체류시간이 기존 연소기보다 훨씬 긴 mild 연소기에 경우 상대적으로 느린 화학 반응시간을 갖는 NOx 생성 반응기구에 대한 시간거동의 영향이 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

본 연구는 Ozdemir와 Plessing에 의해 수행된 mild 연소기 실험결과^{4,7)}를 토대로 mild 연소현상을 해석하기 위한 수치모델 개발 및 검증을 일차 목표로 하였다. 층류 화염편 모델을 이용하여 계산을 수행하였으며, 복사 영향을 고려하기 위하여 유한 체적법 복사모델을 이용하였다.^{11,12)}

2. 수치 모델

2.1 층류 화염편 모델

층류 화염편 모델은 연소 화학반응이 난류 유동장내에의 화염편의 얇은 층에서 빠르게 발생한다는 가정에 기초하고 있다. 화염편 방정식은 화학종 및 에너지 보존방정식으로부터 층류 화염편내 반응면에 수직방향에 대한 Peters 좌표변환을 통해 얻어진다.⁸⁾ 혼합분율을 매개변수로 층류 화염편 내의 혼합과정 및 화학반응에 대한 화염편 방정식은 아래의 1차원 상미분 연립방정식으로 정리된다.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{x}{2} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + \frac{\dot{\omega}_i}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{x}{2} \frac{1}{c_p} \frac{\partial^2 h}{\partial Z^2} - \frac{x}{2} \frac{1}{c_p} \sum_{k=1}^N h_k \frac{\partial^2 Y_k}{\partial Z^2} - \frac{1}{\rho c_p} \left(\sum_{k=1}^N h_k \dot{\omega}_k + q_R \right) \quad (2)$$

여기에서 ρ 는 밀도, T 온도, Y_i i -번째 화학종의 질량분율, x 스칼라 소산율, C_p 정압비열, t 시간, Z 질량분율, $\dot{\omega}$ 반응율, h 엔탈피, q_R 단위체적당 복사열 손실을 각각 나타낸다. 위의 방정식들의 유도과정에서 압력은 일정하고 Lewis 수는 모든 화학종에 대해 1로 동일하다고 가정하였다. Peters의 화염편 방정식에서 알 수 있듯이 층류 화염편에서 반응물은 분자확산에 의해서만 화염면으로 수송될 수 있으며, 이를 지배하는 변수인 스칼라 소산율, x 는 확산에 의한 특성시간의 역수로 해석될 수 있다. 따라서

층류 화염편 모델에 있어서 난류에 의한 미세화염 구조의 변환은 스칼라 소산율에 의해 지배되게 된다. 층류 화염편내의 스칼라 소산율은 혼합분율에 대해 일정하지 않으며 Pitsch는 DNS 계산결과를 통해 다음과 같이 모델링하였다.⁹⁾

$$x = x_{st} f(Z) = x_{st} \frac{Z^2}{Z_{st}^2} \frac{\ln Z}{\ln Z_{st}} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 화학평형에 가까운 낮은 값에서 소염이 발생하는 높은 값까지의 범위를 갖는 화학당론적 혼합분율의 스칼라 소산율(x_{st})에 대하여 혼합분율에 대한 스칼라 소산율을 유도하였다. 화염편 방정식 (1,2)을 해석하여 주어진 화학당론적 혼합분율의 스칼라 소산율(x_{st})에 대한 모든 화학종 및 열적 상태량들 구하고, 화염편 라이브러리를 구성하였다.

2.2 복사 모델

복사 영향을 고려하지 않는 단일 화염조건인 경우에는 모든 열화학적 상태량들은 혼합분율(Z)과 화학당론적 스칼라 소산율(x_{st})에 의해 결정되어진다. 층류 화염편 모델에서 복사에 의한 영향을 고려하기 위하여 엔탈피 defect 개념을 적용하였다.¹⁰⁾

$$\zeta = h - [h_0 + Z(h_1 - h_0)] \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 엔탈피 defect 변수(ζ)는 복사의 영향이 고려된 유동장내의 엔탈피와 단일상태 엔탈피의 차로써 나타낸다. 따라서 본 연구에 적용된 비단열 층류 화염편 모델은 화염편 에너지 방정식 (2)에 대하여 엔탈피 defect 개념을 적용함으로써 세 개의 독립변수인 혼합분율(Z), 화학당론적 스칼라 소산율(x_{st})과 엔탈피 defect 변수(ζ)를 이용하여 화염편 라이브러리를 구성한다. 그리고 복사열 전달을 고려한 연소 유동장내의 엔탈피 수송방정식은 다음 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) - \overline{\nabla \cdot q_{rad}} \quad (5)$$

본 연구에서 복사 열손실을 계산하기 위하여 비정렬 격자계에 적용 가능한 유한 체적법 복사모델

을 개발 적용하였으며,^{11,12)} 이에 따른 식 (5)에서의 마지막 항은 식 (6)으로 표현되어진다.

$$\nabla \cdot \mathbf{q}_{rad} = k(4\pi I_b - G) \quad (6)$$

여기에서 k 는 혼합물의 흡수계수, I_b 는 흑체복사량, 그리고 G 는 입사되는 복사량으로 아래와 같이 정의된다.

$$G = \int_{4\pi} I(\vec{r}, \hat{s}) d\Omega \quad (7)$$

식 (7)에서 복사강도 I 을 구하기 위하여 복사 열전달 방정식을 해석하게 된다. 연소장 내의 입자에 의한 산란현상이 무시될 경우에 복사 열전달 방정식은 식 (8)로 나타나게 된다. 유한 체적법 복사모델은 구형좌표계의 ϕ 방향과 θ 방향에 대하여 $N_\phi \times N_\theta$ 개의 입체각을 구성하고, 각 입체각에 대하여 복사경로 (s)에 따라 유한 체적법을 적용함으로써 식 (8)로부터 복사강도를 계산한다.

$$\frac{dI}{ds} = k(I_b - I) \quad (8)$$

연소장 내의 복사 열전달을 고려함에 있어서 가장 어려운 점은 혼합물의 복사 물성치인 흡수 계수 (k)를 결정하는 문제이다. 본 연구에 있어서는 Smith의 회색가스 가중합 모델(WSGGM) 계수를 이용하여 단순 회색가스 모델(SGG)을 적용하여 유효 흡수 계수를 결정하였다.^{13,14)}

$$k_e = - \frac{\ln[1 - \epsilon_g(T, L_m)]}{L_m} \quad (9)$$

여기에서 ϵ_g 는 총 방사율(emissivity)이며 L_m 은 평균 복사경로 길이이다. 단순 회색가스 모델은 일반적으로 실제적인 예측능력을 갖는 회색가스 가중합 모델 복사모델에 비해 연소장 내의 온도를 낮게 예측하는 경향이 나타난다고 알려져 있다.¹⁴⁾

2.3 NOx 모델

충류 화염편 모델에서는 비정상 화염편 거동을 고려할 수 없는 한계로 인하여 후처리 과정을 통하여 NOx를 예측할 수밖에 없으며, 적절한 NOx 생성율에 대한 모델링이 요구되어진다. 본 충류 화염편 모델에서는 Zeldovich 반응기구에 의한 열적 질소산화물 생성만을 고려하였다.

$$\dot{\omega}_{NO} = M_{NO}(2K_{f,z1}[N_2][O]) \quad (10)$$

여기에서 $K_{f,z1} = 1.84 \times 10^{14} \exp(-38370/T)$ 로 열적 질소산화물 생성율은 높은 온도에 의존적임을 알 수 있다. 식 (10)에 대한 열적 질소산화물 생성율은 충류 화염편 라이브러리로 구성되어 질 수 있으며, 식 (11)의 NO 질량분율에 대한 수송방정식의 후처리 해석으로부터 연소장 내의 NO 분포를 얻어낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{Y}_{NO}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_{NO}) \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial \tilde{Y}_{NO}}{\partial x_j} \right) + \overline{\dot{\omega}_{NO}} \end{aligned} \quad (11)$$

2.4 수치 해법

복잡한 형상과 연소특성을 갖는 난류 연소 유동장을 효과적으로 해석하기 위하여 비정렬 격자 유동해법을 사용하였다. 보존방정식은 해석 격자가 바로 검사체적이 되는 격자 중심 유한 체적법을 사용하여 이산화하였다. 대류항과 확산항에 대해 각각 2차 정확도의 흐름차분법과 중앙차분법을 적용하였다. 연속방정식과 운동량방정식을 동시에 만족시키는 유동해를 구하기 위해 압력기준 해석법인 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다.¹⁵⁾ 난류유동을 해석하기 위하여 k - ϵ 난류모델을 적용하였다. 난류유동방정식과 함께 충류 화염편 모델을 적용하기 위하여 평균 혼합분율(Z)와 변동량(\tilde{Z})에 대한 수송방정식을 계산하여 연료와 산화제의 혼합과 확률분포를 예측하였다.¹⁶⁾

3차원의 복잡한 연소기 형상에 대한 정확한 복사 영향을 충분히 고려하기 위하여 $N_\phi \times N_\theta (6 \times 6)$ 개의 입체각을 적용하였으며 복잡한 형상의 경계조건에서 피할 수 없는 control angle overhang을 처리하기 위하여 $N_{p\phi} \times N_{p\theta} (4 \times 4)$ 의 pixelation 기법을 적용하였다.¹²⁾

충류 화염편 라이브러리를 이용하여 비단열 화염장내의 평균 상태량을 결정하기 위하여 세 독립변수들로 구성된 복합 확률분포함수를 이용하였다.

$$\tilde{\psi} = \iiint \phi^{SLFM}(Z, \chi_{st}, \zeta) \tilde{P}(Z, \chi_{st}, \zeta) dZ d\chi_{st} d\zeta \quad (12)$$

그리고 식 (11)의 생성항인 NO 생성율을 구하기 위해서 식 (13)을 이용한 시간평균값을 구하였다.

$$\bar{\psi} = \bar{\rho} \int \int \int \frac{\psi_{SLFM}(Z, \chi_{st}, \xi)}{\rho_{SLFM}(Z, \chi_{st}, \xi)} \hat{P}(Z, \chi_{st}, \xi) dZ d\chi_{st} d\xi \quad (13)$$

위 식 (12), (13)에서 혼합분율과 변동치에 대해서는 beta 확률분포를 가정하였으며, 엔탈피 defect의 경우 delta function을 가정하였다.¹⁶⁾

3. 수치 해석

3.1 Mild 연소기

Mild 연소해석 대상인 연소기는 Plessing과 Ozdemir에 의해 실험적으로 연구되었고^{4,7)} Coehlo에 의해 화염편 모델을 이용하여 수치적으로 해석되었던 연소기로서 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다.⁶⁾ 250mm × 485mm의 사각형 연소기 형상으로 버너와 출구가 연소기 밑면에 같이 장착되어 있다. 버너 중앙에 직경 4mm의 연료 노즐이 있으며 그 주변으로 6개의 4.7mm의 직경을 갖는 공기 노즐이 위치해 있다.

연료는 메탄이며 공기와 연료의 질량 유량은 각각 6.5 kg/hr와 0.38 kg/hr 이며, 이는 당량비 1에 해당하는 조건이다. 연소기 밑면으로 배출되는 고온의 배기가스는 열교환기를 거치면서 연소공기를 가열시키게 된다. 입구 공기온도에 대한 측정치가 없어 Coehlo의 경우 열교환기 효율을 고려하여 650K로 가정하였으며 본 해석에도 동일한 조건이 사용되었다.⁶⁾

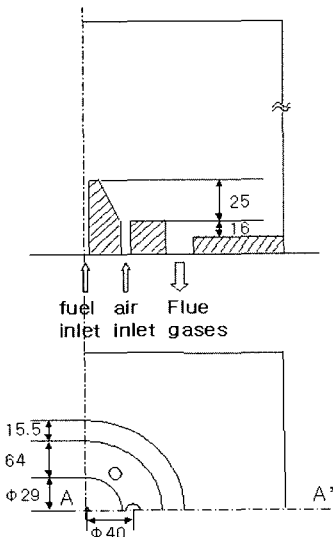


Fig. 1 The Mild Combustor

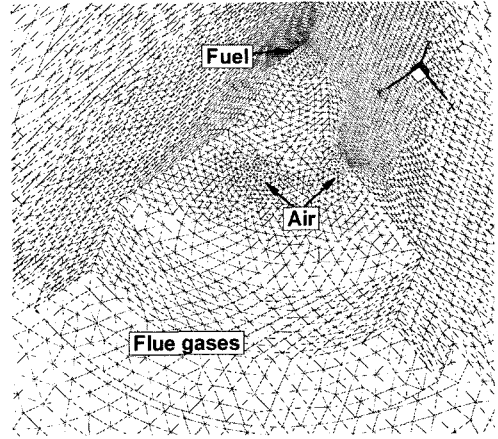


Fig. 2 The grid system of Mild combustor; cell type (tetrahedral), cell number(139928)

Fig. 2는 mild 연소기 밑면과 대칭면에 대한 격자계의 일부를 보여주고 있다. 해석 영역은 Fig. 1에 나타났듯이 2개의 대칭면을 갖는 연소기의 1/4 부분에 대해 수행하였다. 연소기 밑면의 버너와 출구의 복잡한 형상과 노즐 측 상류에서의 강한 배기가스 내부 재순환 존재로 인해 이 영역에 많은 격자를 집중적으로 분포시켰다.

3.2 해석결과

본 mild 연소기에 대한 수치결과는 강한 내부 재순환의 존재로 인해 10초 이상의 체류시간을 갖는 연소 유동장으로, 해석 시간이 상대적으로 많이 소요되며 완전한 수렴해를 얻기에 어려움이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3에는 연료 노즐위치를 기준으로 Ozdemir에 의해 계측된 속도와 비교한 결과이다.⁷⁾ Fig. 3의 a) z=12.5mm에서 최대 축방향 속도(Uz)가 실험치에 비해 다소 작게 예측되었다. 이는 본 해석에서 주어진 공기의 질량유량에 대하여 입력 공기의 온도를 650K로 가정한 결과로 초기 공기의 속도가 낮아 입구 측에서 최대 속도를 낮게 예측함으로 사료된다. Fig. 3에서 입력되는 연소공기 유동은 일반 제트 유동형태를 가지고 있으며 k-ε 난류 모델의 한계로 인해 제트유동의 퍼짐을 과대 예측함을 보여주고 있다.

Fig. 4에 Fig. 1의 A-A'면, 즉 y=0인 X-Z 평면에 대

비단열 화염면 모델을 이용한 Mild Combustor의 연소특성 해석

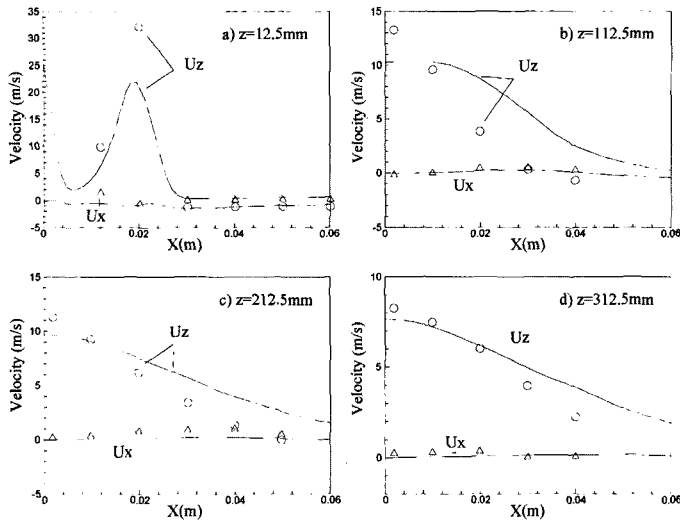


Fig. 3 Predicted profiles of mean velocity(symbol : measurement, line : prediction)

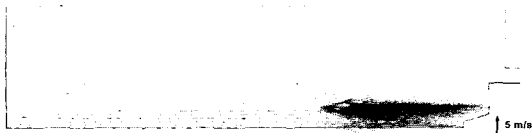


Fig. 4 Predicted velocity vectors at plane $y = 0$

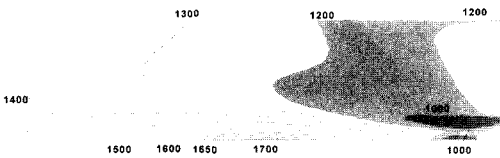


Fig. 5 Predicted temperature contours(K)

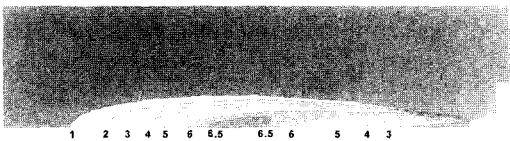


Fig. 6 Predicted contours of OH mass fraction($\times 10^4$)

한 속도분포를 나타내었다. 연소기 내로 들어온 공기와 연료는 배기가스 재순환에 의해 희석되고 연소현상이 발생하면서 연소기 윗면에 이르게 되며 옆면 방향으로 유동이 존재하며 다시 밑면으로 내려오게 됨을 알 수 있다. 배기가스의 일부는 유입되는 공기 제트와 내부 재순환에 의해 혼합되며 일부 배기가스는 배출구를 통해 열교환기를 거치게 된다. Fig. 5에는 예측된 온도 분포를 보여주고 있다.

최도 온도는 1700K를 약간 넘는 것으로 예측되었다. mild 연소기는 고온의 벽면 온도가 존재함으로 인해 배기가스의 온도도 이에 상응하여 최고 화염 온도에 비해 크게 떨어지지 않아야 하며 이는 mild 연소에 대한 Plessing의 well-stirred reactor 모델을 이용한 수치와 실험적 연구에도 잘 나타나 있다.⁴⁾ 고온의 저 Da 수에서의 mild 연소는 매우 낮은 OH 분포를 나타냄을 Plessing 실험에서 예측되었으며 예측된 OH-분포를 Fig. 6에 나타내었다. 예측된 연소장내의 낮은 온도분포는 본 연구에 적용된 단순 회색가스 모델(SGG)이 열손실을 과대 예측함에 따른 결과이다. 주 반응영역내의 연소온도는 1600K대 나타나며 대부분의 연소기는 1200K 이상을 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에 각각 복사 열전달에 주요한 H₂O와 CO₂ 질량분율 분포를 나타내고 있다. 강한 배기가스 내부 재순환의 영향으로 일반 화염에서 보다 높은 농도를 보여주고 있다. Tobacco의 수치 실험연구에서 밝혔듯이 복사 열전달의 중요함을 나타낸다.

Fig. 9에는 후처리 방법으로 계산된 열적 질소산화물을 보여주고 있다. Mild 연소기내의 1700K 이하의 낮은 온도분포로 인해 NO생성이 억제되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 Tobacco의 논문에서 제시되었듯이 온도에 둔감한 NO_x 생성 반응기구 등을 포함한 상세 NO_x 화학반응이 고려되지 않음

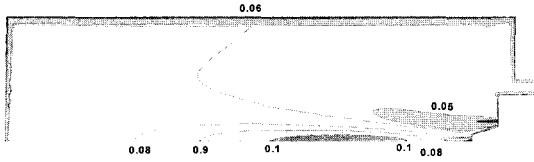


Fig. 7 Predicted contours of H₂O mass fraction

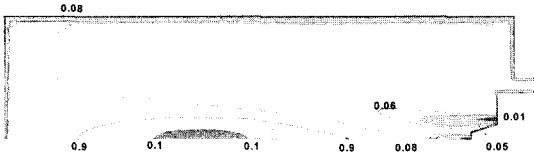


Fig. 8 Predicted contours of CO₂ mass fraction

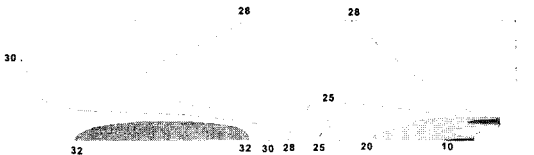


Fig. 9 Predicted contours of NO mole fraction (ppm)

로 인해 Coelho의 비정상 화염편 모델을 이용한 NO_x 예측치의 경향과는 다르게 나타난 것으로 판단된다.^{5,6)}

4. 결론

본 연구에서는 복사 열전달 효과를 고려한 층류 화염편 모델을 이용하여 Mild 연소기에 대한 수치 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 복잡한 연소기 형상과 상류측의 강한 배기가스 재순환 영역이 존재하는 mild 연소기에 대해 비정렬 격자계를 적용하는 것이 매우 유용함을 확인하였다.
- 2) 속도장의 결과로부터 mild 연소현상이 유지되기 위한 배기 가스 재순환 영역이 형성됨을 확인하였다. 이러한 well stirred reactor 영역의 mild 연소에 대하여 층류 화염편 모델의 예측능력은 Coelho의 해석결과에서 보여주었으며 어느 정도 본 연구의 결과에서도 그 가능성이 검증되었다.
- 3) Mild 연소기내의 배기가스 재순환으로 인하여 고온의 반응영역 내에 CO₂와 H₂O의 농도가 기존의 연소기에서 보다 증가하게 되어 복사에 의한

열손실을 반드시 고려해야함을 수치해석을 통하여 확인할 수 있었다. 본 해석에 적용된 단순 회색가스 모델보다는 실제 복사현상을 예측할 수 있는 복사 물성치 모델의 적용이 중요한 요인이 됨을 확인하였다.

- 4) Mild 연소기내의 낮은 온도분포와 재순환 영역의 존재에 따른 긴 체류시간으로 인해 mild 연소에서 NO_x 방출특성을 예측하기 위해서는 NO_x 상세 화학반응과 화염편의 비정상 거동이 함께 요구됨을 확인하였다.

후 기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) J. A. Wuuning and J. G. Wunning, "Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-formation," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.23, pp.81-97, 1997.
- 2) M. Katsuki and T. Hasegawa, "The Science of Technology of Combustion in Highly Preheated Air," 27 Symp (Int) Combustion, pp.3135-3146, 1998.
- 3) A. Cavaliere, M. De Joannon and R. Ragucci, "Mild Combustion of High Temperature Reactants," 2nd International Symposium on High Temperature Air Combustion, 1999.
- 4) T. Plessing, N. Peters and J. G. Wunning, "Laseroptical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation," 27 Symp (Int) Combustion, pp.3197-3204, 1998.
- 5) D. Tabacco, C. Innarella and C. Bruno, "Theoretical and Numerical Investigation on Flameless Combustion," Combust. Sci. and Tech., Vol.174(7), pp.1-35, 2002.
- 6) P. J. Coelho and N. Peters, "Numerical Simulation of a Mild Combustion Burner," Combustion and Flame, Vol.124, pp.503-518, 2001.
- 7) I. B. Ozdemir and N. Peters, "Characteristics of

- the Reaction Zone in a Combustor Operating at Mild Combustion," *Experiments in Fluids*, Vol.30, pp.683-695, 2001.
- 8) N. Peters, *Turbulent Combustion*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
 - 9) H. Pitsch, "Unsteady Flamelet Modeling of Differential Diffusion in Turbulent Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol.123, pp.358-374, 2000.
 - 10) B. Marracino and D. Lentini, "Radiation Modeling in Non-luminous Nonpremixed Turbulent Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.128, pp.23-48, 1997.
 - 11) S. W. Baek, M. Y. Kim and J. S. Kim, "Nonorthogonal Finite-Volume Solutions of Radiative Heat Transfer in a Three-Dimensional Enclosure," *Numerical Heat Transfer B*, Vol.34, pp.419-437, 1998.
 - 12) J. Y. Murthy and S. R. Mathur, "Finite Volume Method for Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes," *J Thermophysics Heat Transfer*, Vol.12, No.3, pp.313-321, 1998.
 - 13) T. F. Smith, Z. F. Shen and J. N. Friedman, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *ASME J Heat Transfer*, Vol.104, pp.602-608, 1982.
 - 14) F. Liu, H. A. Becker and Y. Bindar, "A Comparative Study of Radiative Heat Transfer Modeling in Gas-Fired Furnaces using the Simple Grey Gas and the Weighted-Sum-of-Grey-Gases Models," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.41, pp.3357-3371, 1998.
 - 15) S. M. Kang and Y. M. Kim, "Pressure-based Unstructured-Grid Finite-Volume Method for Simulating Laminar Reacting Flows," *Numerical Heat Transfer B*, Vol.41, pp.53-72, 2002.
 - 16) S. K. Kim, S. M. Kang and Y. M. Kim, "Flamelet Modeling for Combustion Processes and NO_x Formation in the Turbulent Nonpremixed CO/H₂/N₂ Jet Flames," *Comb. Sci. and Tech.*, Vol.168, pp.47-83, 2001.