

C₂H₄/Air 비예혼합 난류화염의 매연생성 모델링

김태훈* · 우민호* · 김용모**

Numerical Modeling of Soot Formation in C₂H₄/Air Turbulent Non-premixed Flames

Taehoon Kim, Mino Woo and Yongmo Kim

ABSTRACT

The Direct Quadrature Method of Moments (DQMOM) has been presented for the solution of population balance equation in the wide range of the multi-phase flows. This method has the inherently interesting features which can be easily applied to the multi-inner variable equation. In addition, DQMOM is capable of easily coupling the gas phase with the discrete phases while it requires the relatively low computational cost. Soot inception, subsequent aggregation, surface growth and oxidation are described through a population balance model solved with the DQMOM for soot formation. This approach is also able to represent the evolution of the soot particle size distribution. The turbulence-chemistry interaction is represented by the laminar flamelet model together with the presumed PDF approach and the spherical harmonic P-1 approximation is adopted to account for the radiative heat transfer.

Key Words : Turbulent non-premixed flame, Direct quadrature method of moments, Soot, Nucleation, Aggregation, Oxidation, Laminar flamelet, Radiation, Population balance equation

1. 서론

탄화수소계 연료를 사용하는 대부분의 비예혼합 화염장의 경우, 연료와 산화제의 혼합에 한계가 있기에 불완전 연소가 발생하고 이에 따라 산화되지 못한 탄화수소들이 엉기면서 매연입자가 발생하게 된다. 이러한 매연입자의 크기분포 및 수밀도와 체적분율에 따른 복사 영향의 예측은 매연 저감을 위한 선행연구로서 반드시 수행되어야하고 더불어 매연입자가 많이 발생하는 비예혼합 화염의 화염구조를 정확히 예측하기 위해서도 필요하다. 매연입자에 의한 복사의 경우 화염장의 기체 생성물에 의한 복사효과 보다 상대적으로 열손실이 크기 때문에 매연입자가 많이 발생하는 화염에서 이를 고려하지 않으면 화염 온도를 과대 예측하게 된다. 비예혼합 화염에서 온도장의 과대예측은 다시 화학종의 농도와 매연생성물의 잘못된 예측을 야기하므로 매연입자의 다양하고 정확한 정보와 화염장과의 상호작용을 고려할 수 있는 매연입자 생성 및 산화모델을 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 비예혼합 화염에서 많이 사용되어 온 Two-equation 모델의 예측 한계를 극복하면서 보다 정확한 매연입자의 특성과 선택한 내부좌표계에 따른 모멘트를 예측할 수 있는 모멘트 직접적분법을 C₂H₄/Air 난류 비예혼합 화염장의 매연생성과정을 모사하는데 적용하여 이러한 모델의 타당성을 확인해 보았다. 수치모델의 검증을 위하여 연료의 분사되는 온도와 연소실 및 노즐의 기하학적 정보는 [1,2,3]의 실험 조건과 동등하게 설정하여 실험값과 비교하였다.

2. 수치 및 물리 모델

2.1. 층류 화염면 모델

난류 확산 화염은 1차원의 구조를 가지는 층류 화염면들의 집합체로 볼 수 있는데 이때 난류 유동은 화염면들을 신장시키거나 주름지게 함으로서 화염면 내부에서 분자 단위의 물질 및 열 확산을 지배하고 비평형 화학반응에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 혼합분율 상에서 Lewis 수와 스칼라 소산율에 의한 변환된 식[4,5]을 사용하여 화염면 계산하였고 이로부터 난류 화염장내의 열·화학적 상태

* 한양대학교 기계공학과

† 연락처자, ymkim@hanyang.ac.kr

량들을 얻을 수 있었다.

2.2. 매연입자 생성과 발달 과정 모델

매연입자 분포 균형 방정식은 연속적인 확률밀도 함수의 수송방정식 형태로 구성되어 있고 이때의 확률밀도함수는 시·공간의 좌표계 이외에 내부좌표계에 따라 그 분포의 변화를 가진다. 선행연구자들에 의하여 다양한 내부좌표계가 매연입자 생성 모델을 위해 검토되었고 본 연구에서는 보다 쉽게 직접적분법을 이용하기 위하여 D.L. Marchiso et al[6]에 의하여 제안된 하나의 내부좌표계(N)를 선정하여 접근하였다.

불안정 연소로 생성된 최초의 매연입자들(N_p)은 서로 충돌, 엉기면서 집합체를 생성하고 이러한 집합체내(N_{pa})에 존재하는 초기 매연입자들의 개수(N)는 매연생성 과정을 모델링하는데 유용한 내부 변수로 사용될 수 있다[1-3,6]. 이를 바탕으로 N 을 내부 좌표계로 가지는 매연입자 분포 균형 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{n}(N)) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}u_j\tilde{n}(N)) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\phi} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}\tilde{n}(N)) \right] & (1) \\ = \rho_b(N-1) + \frac{\rho}{2} \int_0^N \beta(N-N',N')\tilde{n}(N-N')\tilde{n}(N')dN' \\ - \bar{\rho} \int_0^{+\infty} \beta(N-N')\tilde{n}(N)\tilde{n}(N')dN' - \frac{\partial}{\partial N} [\bar{\rho}\dot{N}(N)\tilde{n}(N)] \end{aligned}$$

여기서 $\tilde{n}(N)$ 은 N 에 해당하는 수밀도이며 오른쪽 항들은 차례대로 초기매연입자의 생성, 매연입자들의 엉김, 매연입자의 산화와 표면성장으로 인한 연속적인 변화를 나타낸다. 엉김 커널 β 는 온도와 N 의 함수로 Fuch[10]의 모델을 이용하였다. 매연입자의 수밀도함수 $\tilde{n}(N)$ 는 N 에 대한 모멘트로 나타내면,

$$m_k(x,t) = \int_0^{+\infty} \tilde{n}(x,t;N) N^k dN \quad (2)$$

위와 같은 0차 모멘트는 매연 집합체(N_{pa})의 수밀도, 1차는 초기 매연입자(N_p)들의 수밀도를 나타낸다. 각각의 생성, 엉김, 연속적인 변화들의 보조 모델은 실험을 통한 선행연구자들의 실험식을 이용하였고 매연입자 체적분율의 수송방정식에서 다음과 같이 나타낸다[7-11].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\bar{\rho}f_v] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}u_j f_v] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\phi} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}f_v] \right] & (3) \\ = \bar{\rho}[v_0 J(x,t) + (G(x,t) - O(x,t))m_0] \end{aligned}$$

이때 오른쪽의 생성항은 차례대로 매연입자의 초

기 생성을 J [7], 표면 성장률 G [8], 산화율 O [9] 을 나타내고 m_0 에 의하여 엉김의 영향을 고려했다.

2.3. 직접적분법을 이용한 PBE 해석

직접적분법은 PBE(Population Balance Equation) 같이 내부좌표계를 가지는 방정식에서 수밀도 함수를 N_d 개의 델타함수의 합으로 가정하고 적분하여 다음과 같이 수밀도함수의 모멘트를 근사하여 얻는 모델링 기법이다.

$$m_k(x,t) = \int_0^{+\infty} \tilde{n}(N;x,t) N^k dN \approx \sum_{\alpha=1}^{N_d} w_\alpha(x,t) N_\alpha(x,t)^k \quad (4)$$

주어진 $2N_d$ 개의 모멘트 분포로부터 다음의 수송 방정식을 이용하여 w_α 와 N_α 을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\bar{\rho}w_\alpha] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}u_j w_\alpha] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\phi} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}w_\alpha] \right] = \bar{\rho}a_\alpha \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\bar{\rho}w_\alpha N_\alpha] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}u_j w_\alpha N_\alpha] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\phi} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho}w_\alpha N_\alpha] \right] & (6) \\ = \bar{\rho}b_\alpha \end{aligned}$$

여기서 생성항인 a_α 와 b_α 는 앞서 모델 한 초기 매연입자의 생성, 엉김, 연속적인 변화를 고려한 모멘트의 생성항의 합 \tilde{S}_k 로부터 얻을 수 있다. 예를 들어 4개의 모멘트 정보를 이용할 경우, 두 종류의 내부좌표계 N_1, N_2 와 그에 따른 수밀도 w_1 과 w_2 으로 매연입자의 정보가 구성된다. 이 네 가지의 성분은 위의 식 (5), (6)을 통해서 얻을 수 있고, 이를 위한 생성항 a_α 와 b_α 는 모멘트의 생성항의 \tilde{S}_k 로부터 계산되는 다음의 선형 방정식으로부터 얻을 수 있다.

식 (7)에서 수정항 \tilde{C}_k 는 식 (8)과 같이 나타나고 이는 PBE 방정식을 직접적분법을 통하여 선형화 시키는 과정에서 나타나는 수치적 확산항이다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -N_1^2 & -N_2^2 & 2N_1 & 2N_2 \\ -2N_1^3 & -2N_2^3 & 3N_1 & 3N_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{S}_0 + \tilde{C}_0 \\ \tilde{S}_1 + \tilde{C}_1 \\ \tilde{S}_2 + \tilde{C}_2 \\ \tilde{S}_3 + \tilde{C}_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tilde{C}_k = k(k-1) \sum_{\alpha=1}^{N_d} N_\alpha^{k-2} w_\alpha \Gamma_\alpha \frac{\partial N_\alpha}{\partial x_i} \frac{\partial N_\alpha}{\partial x_i} \quad (8)$$

2.4. 수치적 세부내역 모델

다양한 화학종들의 넓은 범위에서의 열·화학적 상태량들을 얻기 위해서 CHEMKIN 패키지를 이용

하였고 C₂H₄/Air의 화학반응모델로는 GRI-Mech 2.11을 사용하였다[12,13]. 모든 지배방정식의 해는 유한 체적법 기반으로 구하였고 원통 좌표계와 함께 non-staggered 격자를 사용하였다. 매연 입자에 의한 복사 열손실을 Fig. 2의 오른쪽 그림 결과를 제외한 모든 계산에서 고려하였으며 이를 위하여 흡수 계수로 Sazhin[14]의 모델을 사용하였다. 복사 열손실은 에너지 수송 방정식에 아래와 같은 복사 열손실 생성항으로 고려하였으며

$$S_{h,rad} = -\sigma f_v a_s (T^4 - T_\infty^4) \quad (9)$$

여기서 σ 는 볼츠만 상수이고 a_s 는 매연 입자에 의한 열 흡수 계수이다.

난류 모델로는 standard $k-\epsilon$ 을 이용하여 속도장을 예측하였고 압력과 속도의 상호 결합은 PISO 알고리즘을 사용하였고[15] 2차 정확도를 가지도록 확산항과 대류항을 차분하였다. 유동 알고리즘의 자세한 설명은 다음의 참고문헌 [15,16]에 설명되어 있다.

3. 결과

먼저 해석결과를 바탕으로 각각의 보조 물리 모델 항들이 매연 생성 과정에 어떻게 영향을 미치는지 그리고 매연입자의 복사 영향이 화염 온도를 얼마나 변화시키는지 살펴보았다.

Fig. 1은 앞에서 설명한 매연입자균형 방정식 (1)과 매연입자 체적분율의 수송방정식 (3)의 생성항으로 나타나는 보조 물리 모델인 매연입자 생성율($J[m^{-3} s^{-1}]$), 엉김율($AR[m^{-3} s^{-1}]$) 표면 성장률($G[m^3 s^{-1}]$), 산화율($O[m^3 s^{-1}]$)을 차례대로 나타낸 것이다. 먼저 생성율의 분포를 보면 노즐에서 에틸렌(C₂H₄)이 빠른 속도로 분사되면서 주위의 공기와 혼합되어 연소가 진행된다. 이때 에틸렌(C₂H₄)의 결합이 깨지면서 아세트틸렌(C₂H₂)을 생성하게 되고 연료와 비교하여 산화제가 농도가 낮은 곳의 화염에서 주로 초기 매연입자가 생성되는 것을 볼 수 있다. 이는 본 연구에서 사용하고 있는 매연 입자 생성 모델이 아세트틸렌(C₂H₂)을 매연입자의 기본 화학종으로 가정했기 때문이다. 표면 성장률도 마찬가지로 생성율이 나타나는 곳에서 주로 분포가 되는데 이는 모두 아세트틸렌(C₂H₂)을 선행물질로 사용하고 있기 때문이다. 엉김율의 경우 생성된 매연입자의 수밀도가 높을수록 충돌되어 엉김 확률이 높기 때문에 생성율이 높게 나타나는 영역에서 주로 분포한다. 마지막으로 산화율의 경우 매연입자가 산화되기 위한 온도와 충분한 산소의 농도를 모두 만족시키는 화염의 바깥쪽 측면에서 주로 분포된다.

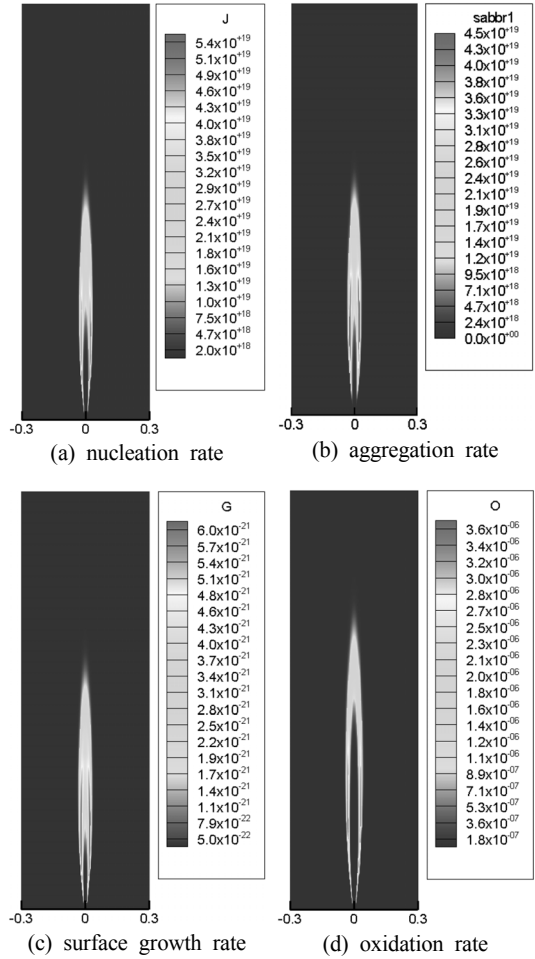


Fig. 1. Distribution of nucleation rate, aggregation rate, surface growth rate, oxidation rate.

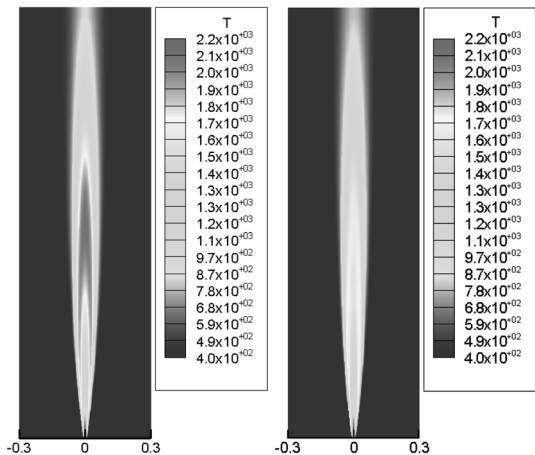


Fig. 2. Distribution of temperature without soot radiation (left) and with soot radiation(right).

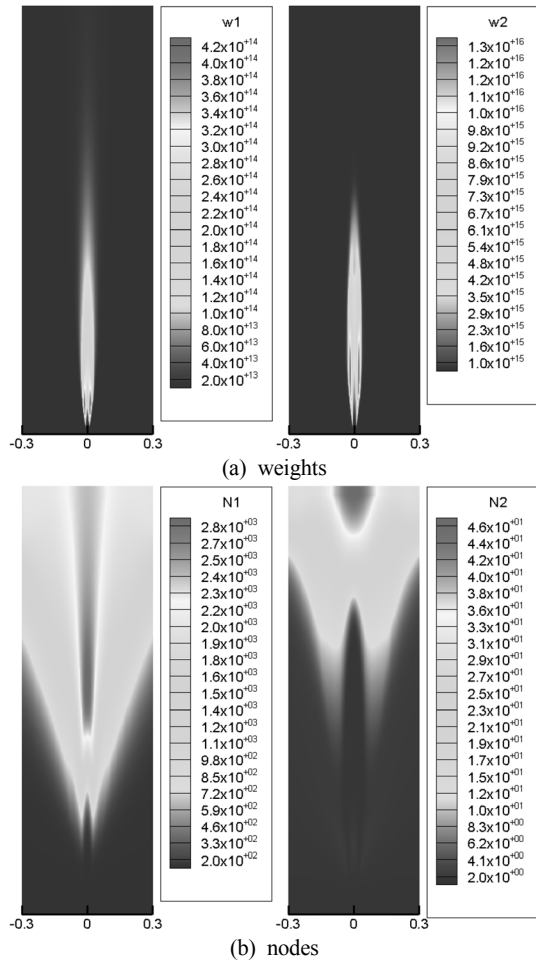


Fig. 3. Distribution of weights and nodes.

앞에서도 언급했듯이 매연입자가 많이 발생하는 비예혼합 화염에서 매연입자의 복사열전달은 화염 온도를 예측하는데 있어서 중요한 인자이다. 이러한 효과는 Fig. 2에서 쉽게 확인할 수 있는데 왼쪽의 화염은 매연입자의 복사열전달로 인한 열손실을 고려하지 않은 계산 결과이고 오른쪽은 이를 고려한 결과로 차이를 쉽게 확인하기 위해서 같은 온도 범위로 나타내었다. 본 연구 결과로부터 매연입자의 복사열전달을 고려하면 고려하지 않은 화염에 비하여 온도가 최대 500K 하강하는 결과를 보여주었고 이는 매연입자에 의한 열손실이 복사열전달 영향이 미비한 제트화염임에도 불구하고 전체 화염구조에 무시할 수 없는 영향을 주는 것으로 판단할 수 있었다.

다음으로 Fig. 3은 직접적분법에서 모멘트를 구성하는 내부좌표계 N 과 그에 해당하는 수밀도 함수인 W 의 분포를 나타낸 것이다. 내부좌표계와 수밀도가 각각 2개씩 나타나는 이유는 본 연구에서 내부좌표

계의 종류를 집합체내에 존재하는 초기 매연입자들의 개수, N 하나로 정의하였기 때문이다. 여기서 환경 변수라 정의되는 N_d 는 내부좌표계 종류의 2배수로 여기에서는 '2'로 정의된다. 따라서 내부좌표계가 $N1$ 과 $N2$ 로 타나며 마찬가지로 각각의 수밀도가 $W1$ 과 $W2$ 로 구성된다. 여기서 내부좌표계 N 과 수밀도 W 의 1, 2는 각기 다른 크기의 초기 매연입자를 대표하며 $N1$ 과 $W1$ 의 초기 매연입자 크기가 $N2$ 와 $W2$ 의 크기보다 상대적으로 크다. 본 매연입자 모델에서 물리적으로 내부좌표계는 하나의 매연입자 집합체 안에 포함된 초기 매연입자 개수를 나타내며 수밀도 함수 W 는 각각의 다른 개수의 초기 매연입자를 가지고 있는 매연입자 집합체의 개수를 나타낸다. 이 수밀도 함수의 분포를 살펴보면 매연입자 집합체들은 노즐 근처, 즉, 화염의 상류에서 활발하게 생성되며 하류 쪽으로 이동하면서 산화제와의 빈번한 접촉으로 산화되어 그 개수가 감소한다. 내부좌표계 분포의 경우 하류 쪽으로 이동하면서 그 값이 증가하는 경향을 보이는데 이는 화염의 상류에서 생성된 초기 매연입자들이 유동에 의하여 하류 쪽으로 이동하면서 충돌이 일어나 매연입자 집합체가 생성되는 영감의 과정을 보여주고 있다.

다음으로 실험값[1,2,3]들과 해석결과를 비교하면 먼저 Fig. 4는 중심축에 따라 분포하는 평균 온도를 실험값과 비교한 그림으로 실선은 매연입자에 의한 복사열전달을 고려한 것이고 점선은 이를 고려하지 않은 결과이다. 앞서서도 언급했듯이 C₂H₄/Air의 난류 비예혼합 화염은 매연입자에 의한 복사열전달의 영향에 따라 온도 예측 값이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 체류시간이 상대적으로 짧은 상류 쪽은 복사의 영향보다는 난류의 영향으로 온도가 결정되므로 매연입자의 복사 영향에 상관없이 일정하게 나타나고 하류 쪽으로 이동하면서 기체 생성물 및 매연입자의 복사 효과로 이를 고려하지 않았을 때와는 큰 차이를 보이면서 온도가 하강하는 것을 확인하였다. 본디 보다 체계적으로 화염구조를 확인하기 위해서는 혼합분율, 속도, 화학종 그리고 온도의 반경방향과 중심축에 따른 실험값들과의 비교, 분석이 필요하나 본 실험에서는[1,2,3] 매연입자 계측에 집중하여 이러한 실험값들에 대한 정보가 없었기 때문에 추가적인 비교를 할 수 없었다.

이어서 Fig. 5는 매연입자의 체적분율을 중심축에 따라 나타낸 것으로 z/D 가 70인 상류 쪽은 실험값과 비교하여 근사하게 예측하고 있지만 후류 쪽으로 이동하면서 과소 예측하는 특성을 보이다가 $z/D=150$ 이후부터는 반대로 과대 예측하는 경향을 보여주게 된다. 화염의 중심 부근에서 체적분율을 과소 예측하는 것과 후류 쪽에서의 과대 예측하는 경향

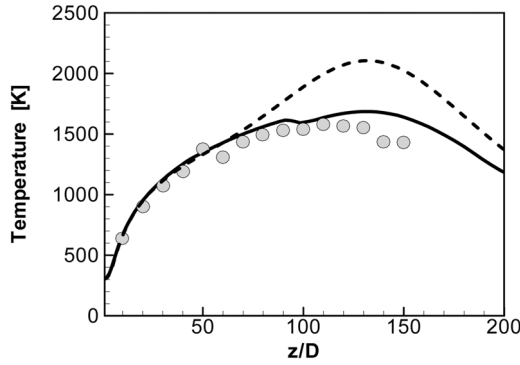


Fig. 4. Axial profile of temperature along the centerline with soot radiation(solid line), without radiation (dashed line) with experimental data[1,2,3].

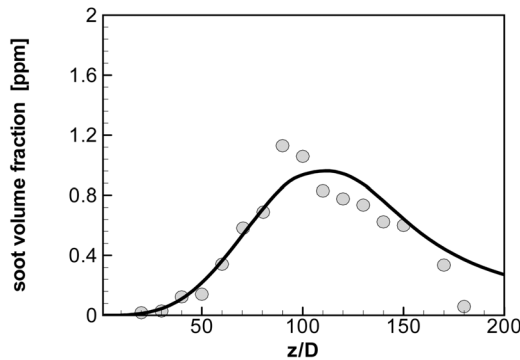


Fig. 5. Axial profile of soot volume fraction along the centerline with experimental data[1,2,3].

은 뒤에서 설명될 매연입자의 엉김과 산화되는 작용이 직접적으로 연관된 나타나는 결과로 생각된다.

계속해서 매연입자의 정보는 Fig 6, 7에서 차례대로 초기 매연입자의 수밀도 그리고 매연입자 집합체의 수밀도로 표현되고 있다. 이는 이전의 매연입자 예측 모델에서 표현하기 어려웠던 정보로 비교적 실험값과 근사하게 그 값을 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 6에서 나타난 초기 매연입자의 수밀도 경우에 매연입자가 생성되기 시작하는 $z/D=70$ 까지는 실험값을 잘 예측하고 있지만 화염의 후류 쪽에서는 실험값보다 높게 수밀도를 예측하고 있다. 이러한 경향이 나타나는 이유 중 하나로 본 연구의 매연입자 산화 모델을 그 이유로 생각할 수 있는데 이는 산화 모델에서 OH 라디칼에 의한 산화는 고려하지 못하고 산소에 의한 산화만 고려하고 있기에 나타난 결과로 Fig. 1의 (d)에서도 볼 수 있듯이 산소가 희박한 화염 안쪽 부근에서 충분한 매연입자의 산화가 일어나고 있지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 경향은 앞에서 언급했던 후류에서의 매연입자 체적분율의 과대 예측과 관련되어 있다.

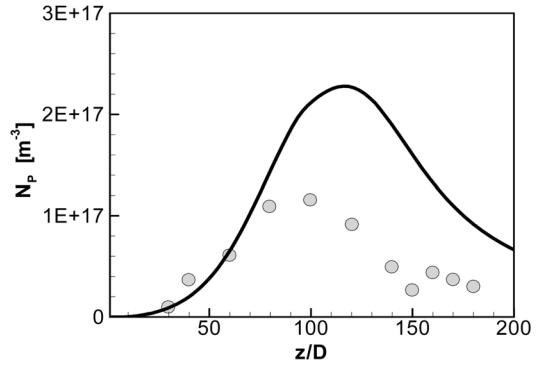


Fig. 6. Axial profile of total primary particle number density along the centerline with experimental data[1,2,3].

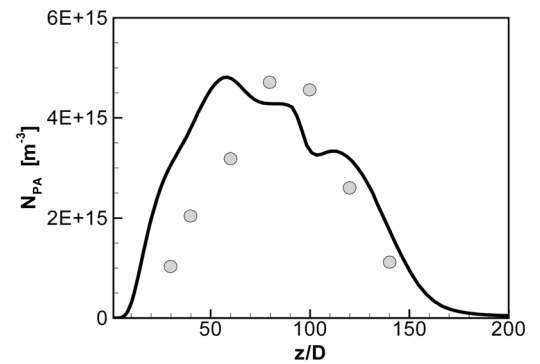


Fig. 7. Axial profile of total aggregate number density along the centerline with experimental data[1,2,3].

마지막으로 Fig. 7은 Fig. 6에서 표현된 초기 매연입자들이 그 수밀도가 증가하면서 충돌이 빈번하게 일어남에 따라 서로 엉기면서 생성된 매연입자 집합체의 수밀도를 실험값과 비교하여 나타낸 것이다. 전체적인 경향성은 실험값에 근사하게 나타나고 있지만 화염의 상류 쪽과 중심부에서 실험값과 벗어나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6에서 나타난 초기 매연입자들의 수밀도가 화염 중심부 이후부터 실험값에 비하여 과대 예측하고 있음에도 불구하고 Fig. 7에서 나타나는 이들의 엉김으로 생성된 매연입자 집합체는 실험값에 비하여 과소예측 하거나 비교적 근사하게 예측하는 결과를 보여주는데 이는 식 (1)에서 나타난 엉김 커널($\beta(N, N', T)$)이 본 연구에서 과대 예측되고 있기 때문이다. 또한 중심부에서의 매연입자 집합체 수밀도의 과소예측은 앞에서 언급한 매연입자 체적분율의 과소예측에 밀접하게 관련되어 있다.

4. 결론

본 연구에서는 매연입자 생성 방정식과 같은 내

부좌표계를 포함하고 있는 입자의 거동 방정식을 수치적으로 보다 효율적이면서 정확하게 예측할 수 있는 직접적분법을 이용하여 비예혼합 난류 화염장의 매연입자 생성과정을 예측하여 보았다. 여기에서는 수치적인 결과를 바탕으로 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 직접적분법은 매연입자의 생성, 영김, 표면의 성장 그리고 산화와 같은 복잡한 매연입자 생성발달과정을 제대로 모사할 수 있는 예측능력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

2) 매연입자 집합체내의 초기 매연입자의 개수는 집합체가 하류 쪽으로 이동하면서 계속적으로 초기 매연입자들과 충돌함에 따라 증가하였다.

3) C₂H₄/Air의 난류 비예혼합 화염은 매연입자에 의한 복사열전달의 영향에 따라 온도 예측 값이 크게 개선되었으며 특히 체류시간이 길어지는 하류 쪽에서 기체 생성물 및 매연입자의 복사 효과로 인하여 온도가 크게 하강하는 것을 확인하였다.

4) 하류 영역에서의 초기 매연입자와 체적분율을 과대 예측하는 이유 중 하나로 OH 라디칼에 의한 매연입자 산화 모델을 고려하지 못한 결과라고 생각할 수 있다.

5) 아직 하나의 내부좌표계로 표현된 입자 생성 방정식만으로는 매연입자의 거동 및 원하는 값을 표현하기에는 한계가 있기에 각각의 보조 물리 모델에 대하여 실험적인 방법을 통한 지속적인 해석모델의 개발과 매연입자 생성 과정을 보다 자세하게 표현할 수 있는 추가적인 내부좌표계를 고려하여 모델링할 필요가 있으며 이러한 모델의 검증을 위한 실험적인 연구도 함께 수행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구입니다(No. D00103).

참고문헌

[1] B. Hu, B. Yang, U. O. Koylu, "Soot measurements at the axis of an ethylene/air non premixed turbulent jet flame", *Combustion and Flame*, Vol. 134, 2003, pp. 93-106

[2] B. Hu, U. O. Koylu, "Size and morphology of soot particulates sampled from a turbulent non-premixed acetylene flame", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 38, 2005, pp. 1009-1018

[3] B. Hu, B. Yang, U. O. Koylu, "Mean soot volume

fractions in turbulent hydrocarbon flames: a comparison of sampling and laser measurements", *Combustion Science and Technology*, Vol. 177, 2005, pp. 1603-1626

- [4] N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion", *Proceeding 21st Symposium International Combustion*, Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1234-1250
- [5] H. Pitsch, N. Peters, "A consistent flamelet formulation for non-premixed combustion considering differential diffusion effects", *Combustion and Flame*, Vol. 114, 1998, pp. 26-40
- [6] D. L. Marchiso, A. A. Barresi, "Investigation of soot formation in turbulent flames with a pseudo-bivariate population balance model", *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, 2008, pp. 294-303
- [7] M. Fairweather, W. P. Jones, R. P. Lindstedt, "Predictions of radiative transfer from a turbulent reacting jet in a cross-wind", *Combustion and Flame*, Vol. 89, 1992, pp.45-63
- [8] J. B. Moss, C. D. Stewart, K. J. Young, "Modeling soot formation and burnout in a high temperature laminar diffusion flame burning under oxygen enriched conditions", *Combustion and Flame*, Vol. 101, 1995, pp.491-500
- [9] K. Lee, M. W. Thring, J. Beer, "On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame", *Combustion and Flame*, Vol. 6, 1962, pp. 137-145
- [10] N. A. Fuch, *Mechanics of Aerosols*, Pergamon Press, New York, 1964
- [11] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, second ed., Elsevier Science, USA, 2003, pp. 472-478
- [12] R. J. Kee, F. M. Rupley, J. A. Miller, "Chemkin II: A Fortran chemical kinetics package for analysis of gas phase chemical kinetics", Sandia National Laboratories Report, 1989, SAND 89-8009B
- [13] URL http://www.me.berkeley.edu/gri_mech
- [14] S. S. Sazhin, "An approximation for the absorption coefficient of soot in a radiating gas", Manuscript of Fluent, 1994
- [15] G. H. Kim, S. M. Kang, Y. M. Kim, R. W. Bilger, M. J. Cleary, "Conditional moment closure and transient flamelet modeling for detailed structure and NOx formation characteristics of turbulent nonpremixed jet and recirculating flames", *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 11, 2007, pp. 527-552
- [16] S. M. Kang, "Parallel unstructured-grid finite-volume method for chemically reacting flows at

- all speeds”, Ph.D. Thesis University of Hanyang, Seoul, Korea, 2002
- [17] M. Frenklach, H. Wang, “In Soot Formation Combustion, Mechanisms and Models”, Bockhorn H. Ed. Springer Series in Chemical Physics, Vol. 59, 1994, Springer-Verlag, pp. 165-192
- [18] F. Mauss, B. Trilken, H. Breitbach, N. Peters, “In Soot Formation Combustion, Mechanisms and Models”, Bockhorn, H. Ed. Springer Series in Chemical Physics, Vol. 59, 1994, Springer-Verlag, pp. 325-349
- [19] R.P. Lindstedt, “In Soot Formation Combustion, Mechanisms and Models”, Bockhorn, H. Ed. Springer Series in Chemical Physics, Vol. 59, 1994, Springer-Verlag pp. 417-441
- [20] I. M. Kennedy, C. Yam, D. C. Rapp, R. J. Santoro, “Modeling and measurements of soot and species in a laminar diffusion flame”, *Combustion and Flame*, Vol. 107, 1996, pp. 368-382
- [21] A. Lutz, R. J. Kee, J. F. Grcar, F. M. Rupley, “OPPDIF: A Fortran Program for Computing Opposed-Flow Diffusion Flames”, Sandia Report. SAND96-8243. Livermore
- [22] J. C. Ferreira, “Flamelet Modeling of Stabilization in Turbulent Non-premixed Combustion”, PhD Thesis, ETHZ Zuerich Switzerland
- [23] W. A. Sirignano, “Volume averaging for the analysis of turbulent spray flows”, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 31, 2005, pp. 675-705
- [24] R. O. Fox, F. Laurent, M. Massot, “Numerical simulation of spray coalescence in an Eulerian framework: Direct quadrature method of moments and multi-fluid method”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, 2008, pp. 3058-3088
- [25] O. Desjardins, R. O. Fox, P. Villedieu, “A quadrature-based moment method for dilute fluid-particles flows”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, 2008, pp. 2514-2539
- [26] R. G. Gordon, “Error Bounds in Equilibrium Statistical Mechanics”, *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 9, No. 5, 1968, pp. 655-663
- [27] D. L. Marchiso, R. O. Fox, “Solution of population balance equations using the direct quadrature method of moments”, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 36, 2005, pp. 43-73
- [28] S. B. Pope, “An explanation of the turbulent round-jet/plane-jet anomaly”, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 16, 1978, pp. 279-281
- [29] K. M. Leung, R. P. Lindstedt, W. P. Jones, “A simplified reaction mechanism for soot formation in nonpremixed flames”, *Combustion and Flame*, Vol. 87, 1991, pp. 289-305
- [30] U. Vandsburger, I. Kennedy, I. Glassman, “Sooting Counterflow Diffusion Flames with Varying Oxygen Index”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 39, 1984, pp. 263-285

접수일 : 2010. 10. 09

심사완료일 : 2010. 12. 15