비정상 CH_4/공기 제트 확산화염에 관한 수치모사

오창보*, 이창언**

Numerical Simulation of Unsteady CH_4/Air Jet Diffusion Flame

Chang Bo Oh, Chang Eon Lee

Key Words : Numerical Simulation, Unsteady Jet, Flame-Vortex Interaction, Buoyancy Effect

Abstract

Dynamic structures of unsteady CH_4/Air jet diffusion flames with flame-vortex interaction were numerically investigated. A time-dependent, axisymmetric computational model was adopted for this calculation. Two step global reaction mechanism which considers 6 species, was used to calculate the reaction rates. The predicted results including gravitational effect show that the large outer vortices and the small inner vortex street can be well simulated without any additional disturbances in the downstream of nozzle tip. It was found that the temperature and species concentrations had various values for the same mixture fraction in flame-vortex interaction region. This unsteady jet flame configuration accompanying flame-vortex interaction is expected to give good implications for the structure of turbulent flames.

1. 서 론

실용 연소기에 이용되는 화염형태는 대부분 난류화염으로서 연소기의 효과적인 설계를 위해서는 난류화염에 대한 구체적인 정보를 요구한다. 이러한 난류화염에 대한 정보를 실험적 방법에만 의존하여 얻는 것은 매우 어려운 작업이며, 수치해석을 병행한 연구가 필수적이다.

현재 난류화염에 대한 수치해석 방법은 크게 DNS, LES 및 연소모델을 이용한 연구로 분류할 수 있다. 이중에서 DNS 에 의한 연구는 컴퓨터의 성능상 아직 실용 연소기의 난류화염을 해석할 수 있는 수준은 아니며, LES 를 이용한

* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 인하대학교 기계공학과

연구도 현 단계에서는 기하학적 형상이 비교적 단순한 화염에 대한 해석이 주류를 이루고 있다[1, 2]. 따라서 현실적으로 복잡한 형상의 난류화염을 해석하는 방법으로는 연소모델을 이용한 방법이 가장 유용한 것으로 받아 들여 지고 있다[3]. 그러나, 연소모델을 이용한 연구도 실제 화염에 대한 물리적 모델링 측면에서는 아직 개선해야 할 여지가 많으며, 연소모델을 개선하기 위해서는 여러 가지 모델화염을 기반으로, 다양한 조건에 대한 연구를 필요로 한다. 기존에 많이 이용되고 있는 모델화염은 1D 대향류 화염으로서, 이 화염은 기하학적 형상이 간단하면서도 스트레인율 변화에 대한 상세한 화염구조를 쉽게 얻을 수 있어 국소 난류화염의 구조를 이해하는데 많은 도움을 주었다. 그러나 실제 난류화염은 스트레인율 변화 뿐만 아니라 곡률효과 (Curvature Effect) 등을 포함한 다차원적인 화염신장, 압축을 받게 되고, 비정상 효과(Unsteady Effect)도 나타나므로 기존 1D 대향류 화염을 이용한 연구로는 복잡한 난류화염의 구조를 해석하는 데에는 한계가 있다. 따라서 근래에는 2D, 3D 비정상 화염에 대한 해석을 통해 난류화염에 대한 구체적인 정보를 제공하고자 하는 연구들이 진행되고 있다.

이러한 연구 중에서 Katta 등[4]은 2D H_2 제트 확산화염에 대한 계산을 통해 *Le* 수와 화염면 곡률 방향에 따라 화염신장을 받는 영역에서 화염온도가 높고, 화염압축 영역에서는 오히려 화염온도가 낮게 나타나는 등 기존의 대향류 화염을 통해서는 잘 볼 수 없는 화염구조에 대해 보고한 바 있다. 또한 CH_4 제트 화염에 대해 가진을 주어 인위적인 소염을 발생시킨 후, 화염의 소염특성에 대해 검토하여 동적 화염구조에 대한 유용한 결과를 도출한 바 있다[5]. 이와 같이 비정상 제트 화염은 해석조건에 따라서는 복잡한 화염의 국소 구조에 대한 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 화염의 특징을 보여주면서도 비교적 수치모사가 용이한 비정상 제트 확산화염을 대상으로 계산을 수행하여 화염의 비정상 거동 및 와동이 존재하는 영역의 화염구조를 고찰하고, 향후 난류화염의 특징을 모사할 수 있는 모델화염으로서의 이용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식

본 연구에서 대상으로 하는 연소장은 2 차원 축대칭 제트 확산화염이며, 유동조건은 음향속도에 비해 작은 유속을 가지므로 지배방정식은 저 마하수 근사법(Low Mach Number Approximation)을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u})}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u}\boldsymbol{u})=-\nabla p_1+(\rho_0-\rho)\boldsymbol{g}+\nabla\cdot\mu\left[(\nabla \boldsymbol{u})+(\nabla \boldsymbol{u})^T-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\boldsymbol{I}\right] \tag{2}$$

$$\frac{(\partial \rho Y_i)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u} Y_i)=\nabla\cdot(\rho D_{im}\nabla Y_i)+W_i\dot{\omega}_i \tag{3}$$

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla T\right)=\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+\sum_{i=1}^{N}W_i h_i^0\dot{w}_i+\rho\sum_{i=1}^{N}\left(c_{pi}D_{im}\nabla Y_i\cdot\nabla T\right) \tag{4}$$

$$p_0 = \rho R_0 T \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{Y_i}{W_i} \right) \qquad (5)$$

여기서, p_0 와 p_1 은 각각 열역학적 압력과 동적 압력(Hydrodynamic Pressure)을 의미하며, D_{im} 은 혼합기 평균확산계수(Mixture-Averaged Diffusion Coefficient)를 나타낸다.

본 연구에서는 부력효과를 갖는 화염을 계산하기 위해 운동량 방정식에 부력항을 포함하였다. 위 방정식 중에서 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II[7] 및 TRANFIT Package[8]를 이용하여 계산하였다.

2.2 수치해법

지배방정식은 엇갈림 격자계를 이용하여 차분하였으며, 대류항에 대해서 QUICK 법, 확산항에 대해서는 2 차 정확도의 중심 차분법을 이용하였다. 또한 급격한 밀도변동이 수반되는 연소장에서 안정된 해를 얻기 위해서 Najm 등이 제시한 예측-교정자법(Predictor-Corrector Method)[6]을 일부 수정하여 적용하였다. 화학종 및 에너지 방정식에 대한 시간적분은 예측자 단계에서는 2 차 정확도의 Adams-Bashforth 법을 이용하였으며, 교정자 단계에서는 2 차 정확도의 Quasi-Crank-Nicolson 법을 적용하였다. 운동량 방정식은 예측자 및 교정자 단계에서 모두 2 차 정확도의 Adams-Bashforth 법을 이용하였다. 또한 속도와 압력의 교정은 HSMAC (Highly Simplified Marker and Cell)법[9]을 이용하여 대수적으로 효율적인 계산을 수행하였다.

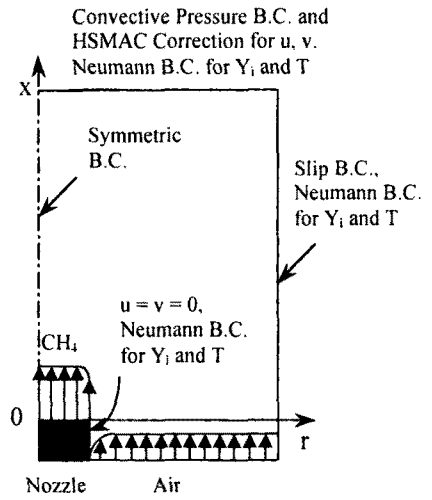


Fig. 1 Schematic of calculation domain and boundary conditions

2.3 계산조건 및 화학반응 모델

계산은 2 차원 축대칭 원통 좌표계를 대상으로 하였다. 화염은 직경 10mm, 림두께 0.46mm 의 노즐에서 생성되는 CH_4–공기 확산화염 형태이며, 연료 및 주위류 공기는 각각 4.0m/s, 0.3m/s 의 유속을 가지며, 298K 의 상온상태로 분출된다. 노즐 출구 속도분포는 연료측 와동을 생성시키기 위해 수축노즐의 유동조건과 유사하게 식 (6)과 같은 속도분포를 주었다[10].

$$U = \overline{U}\left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\tanh\left\{ 20\left(\frac{r}{R} - 1 \right) \right\} \right] \qquad (6)$$

여기서, r 은 반경방향 거리, R 은 노즐 반경, $\overline{U}$ 는 노즐 유속 4m/s 이다.

수치계산은 노즐 출구의 중심을 원점으로 하여, 축방향 거리 -5~220mm, 반경방향 거리 70mm 에 대해 345×110 개의 격자계에서 수행되었으며, 격자는 반경방향으로 노즐림 근처에 밀집된 비균일 격자를 사용하였다.

경계조건은 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 중심축은 대칭조건, 반경방향 외부경계에서 속도에 대해서는 Slip 조건, 화학종과 온도에 대해서는 Neumann 조건을 부여하였다. 출구 경계에서는 와동(Vortex)이 계속하여 경계면을 통과하기 때문에 경계조건 처리가 중요하다. HSMAC 법은 압력에 대한 경계조건을 필요로 하지 않지만 본 계산에서는 출구 경계에서 식 (7)로 정의된 압력에 대한 대류 경계조건(Convective Boundary Condition)을 부여하고, 경계면 밖의 2 점에 대한 속도 경계조건을 외삽법(Extrapolation)을 이용하여 추가로 부여하였다. 그리고 유출 경계에 접한 각 단위 격자 마다 HSMAC 법에 의해 속도-압력을 교정과정을 수행하여, 전 계산영역 및 국소 격자에서 연속 방정식을 만족하도록 하였다.

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} + U_c \frac{\partial p_1}{\partial x} = 0 \qquad (7)$$

여기서, U_c 는 노즐의 평균유속을 의미한다.

CH_4-공기의 화학반응을 고려하기 위해서 Dupont 등[11]이 제시한 2 단계 총괄반응식을 이용하였다. 반응에 참여하는 화학종은 CH_4, CO, CO_2, H_2O 및 O_2 이며 N_2 는 불활성 기체로서 계산에 포함되어 6 개의 화학종이 고려되었다. 이용된 화학반응식과 반응속도(Reaction Rate)를 아래에 나타내었다.

$$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2O \qquad (R1)$$

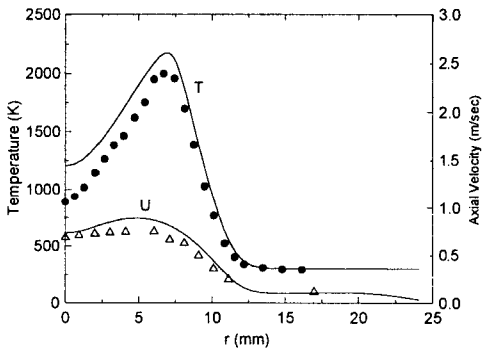
$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2 \qquad (R2)$$

$$RR_1 = 10^{10.0} \exp\left(\frac{-12019}{T}\right)[CH_4]^{1.0}[O_2]^{1.0} \qquad (8)$$

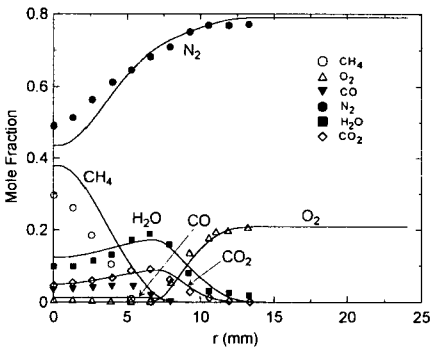
$$RR_2 = 10^{10.0} \exp\left(\frac{-12019}{T}\right)[CO]^{1.0}[O_2]^{1.0} \qquad (9)$$

여기서, [ ]는 각 화학종의 농도를 나타낸다.

반응개시를 위해서는 연료 제트가 계산영역 내에 1/3 정도 전개된 후, 노즐 출구 하류의 일부 격자에 고온의 점화원을 주었다. 반응개시 후 시간 전진은 $\Delta t = 1.0 \times 1.0^{-5}$ 으로 일정하게 하였다.



(a) Temperature and axial velocity



(b) Major species (CH_4, O_2, CO, CO_2, H_2O and N_2)

Fig. 2 Comparison between predicted and experimental results for the confined CH_4 laminar jet diffusion flame

3. 결과 및 고찰

3.1 3.1 절 제목

Fig. 2 에는 수치계산 코드 및 반응기구의 타당성을 검토하기 위해서 Mitchell 등[12]이 수행한 층류 CH_4 제트 화염에 대한 실험을 대상으로 계산한 결과를 비교 도시하였다. 먼저 Fig. 2 (a)의 화염온도 및 유속분포를 보면, 계산에 의해 예측된 화염온도의 최고치가 다소 높게 예측되고 있으며, 이로 인해 유속분포도 약간 높게 예측되고 있으나, 전체적으로 실험치를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2 (b)의 주요화학종 분포에서도 화염대 안쪽에서 CH_4 및 N_2 분포가 실험치와 조금 차이를 보이고는 있으나, 비교적 실험치를 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 검토를 통해, 본 계산에 이용된 반응기구 및 수치계산 코드를 비정상 CH_4 제트 확산화염의 계산에 적용하는 것은 별다른 문제가 없을 것으로 판단된다.

Fig. 3 에는 본 연구에서 대상으로 하는 비정상 제트 화염의 등온선 분포를 도시하였다. 4 개의 온도 그림은 계산영역에서 화염이 완전히 발달된 특정시간을 0ms 로 하고, 이 시간을 기준으로 하여 20ms 간격으로 진행된 화염을 나타낸다. 이들 화염은 비정상 제트 화염의 동적 거동을 잘 보여주고 있는데, 특히, 화염대 내부의 작은 와동(Vortex)과 외부의 큰 와동을 동시에 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 기존 연구를 통해 알려진 바와 같이 화염대 내부의 작은 와동들(이하, 내부 와동(Inner Vortex)으로 칭하겠다.)은 고속 연료 제트와 저속 주위류의 속도차에 의한 불안정에 기인하며, 외부 큰 와동(이하, 외부 와동(Outer Vortex)로 칭하겠다.)은 부력효과에 의해

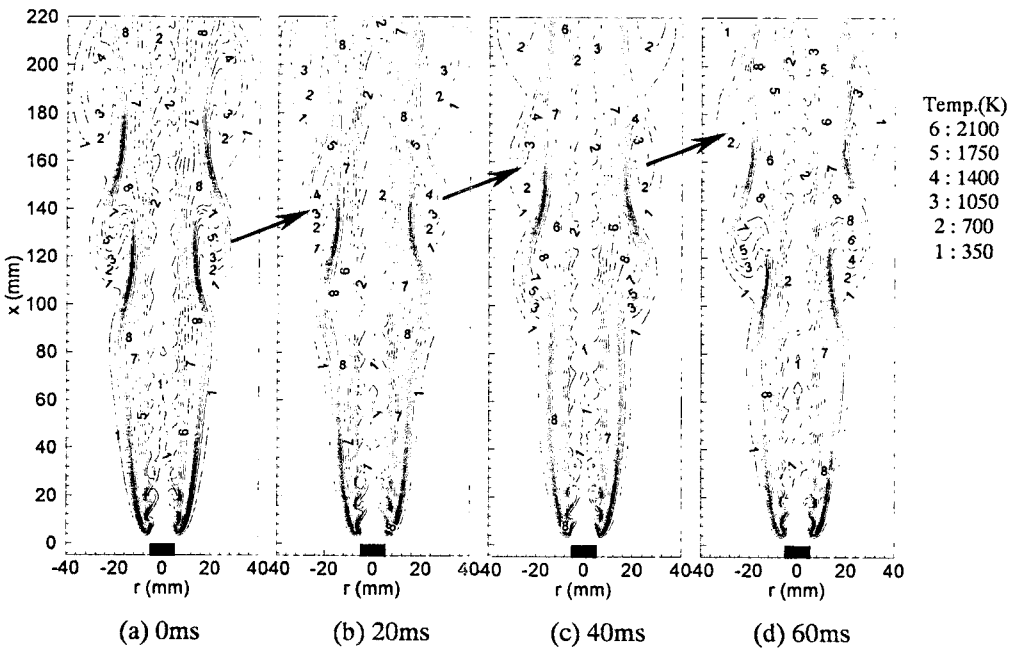


Fig. 3 Time development of temperature isopleths of unsteady CH_4/air jet diffusion flame

발생되는 것으로 알려져 있다[13]. 이와 같은 화염형태는 실험적으로도 확인이 되고 있으나, 수치계산 연구를 수행함에 있어서는 내부 와동을 모사하는데 일부 어려움이 있다. 실험에서는 노즐 출구에서 소음 등의 외부 교란(Disturbance)에 의해서 내부 와동이 생는 것으로 알려지고 있으나, 수치계산에서는 그러한 교란을 인위적으로 만들어 주지 않을 경우, 노즐 출구 근처의 유동 불안정성이 고온 화염대의 높은 점성효과에 의해 감소되기 때문에 내부 와동은 나타나지 않는다. 본 연구에서는 인위적인 교란 없이 내부 와동을 모사하기 위해서, 노즐 출구 근처의 유동 불안정성이 화염에 의해 저감 되지 않도록 화염이 완전히 노즐에 부착되지 않는 조건을 대상으로 계산을 수행하였다. 계산결과 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 화염은 노즐에서 약 4mm 가량 떨어져 있어서, 인위적인 교란 없이도 내부 와동을 잘 모사할 수 있었다.

시간 진행에 따른 화염전개 과정을 살펴보면 내부 와동은 노즐 출구의 화염 안정점(Stabilizing Point) 부근에서 발생하여 x=20~30mm 근처에서 강하게 말리고 있으며, 와동이 하류로 진행하면서 점차 약화되는 것을 알 수 있다. 또한 외부 와동은 x=80mm 근처에서 화염이 외부로 팽창하면서 발생하여 그림의 화살표가 지시하는 것처럼 x=120~130mm 부근에서 강하게 말린 와동이 점차 말림(Roll-up)이 약화되면서 하류로 대류되는 것을 알 수 있다. 이러한 화염의 동적거동은 화염전개 초기 시간을 제외하고는 거의 일정한 주기로 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4 에는 앞에서 설명한 화염 및 와동의 동적거동을 좀 더 자세히 고찰하기 위해서 Fig. 3 의 0ms 시간에 해당되는 화염에 대해 CH_4의 농도분포를 도시하였다. 그림에서 굵은 점선은 양론혼합비의 위치를 나타낸 것으로서 본 논문에서는 이 위치를 화염면으로 정의하였다. 우선, CH_4 연료분포는 내부 와동 형상을 잘 나타내고 있으며, Fig. 3(a)의 온도분포와 비교해 보면, 연료분포는 화염대 내부의 온도분포와 유사한 모양을 보이고 있어 화염대 내부의 온도분포가 연료측의 내부 와동과 연관이 있음을 쉽게 알 수 있다. 또한 상류의 화염대 내부에서는 내부 와동과 화염간의 약한 상호작용으로 화염면은 거의 변형되지 않음을 알 수 있다. 반면에 x=90mm 이후의 하류에 대해 Fig. 3(a)의 온도분포와 비교해서 보면, 외부 와동과 화염의 강한 상호작용으로 인해 화염면이 내부, 외부로 수축, 팽창하여 곡선모양으로 많이 왜곡되는 것을 알 수 있다. 이와 같

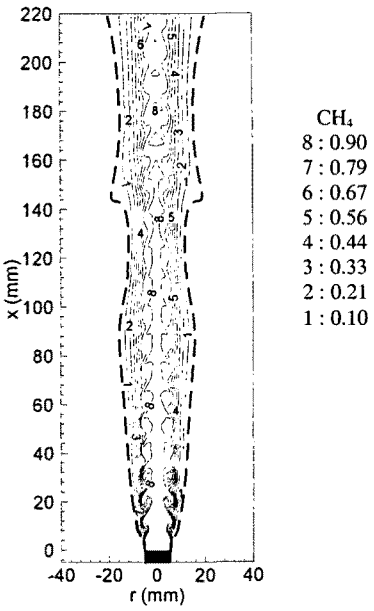


Fig. 4 Isopleth of CH_4 concentration of unsteady CH_4/air jet diffusion flame at 0ms

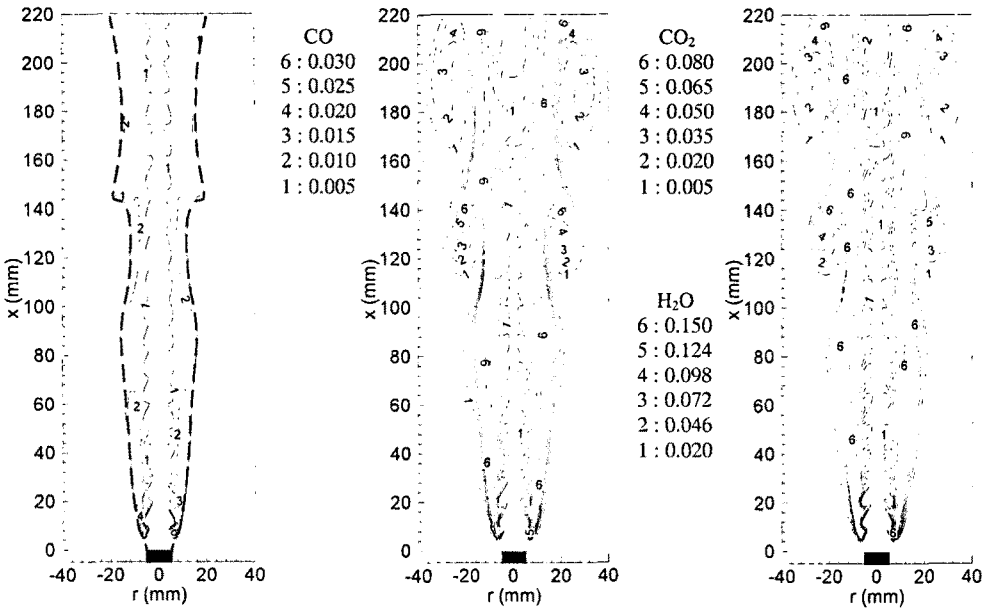
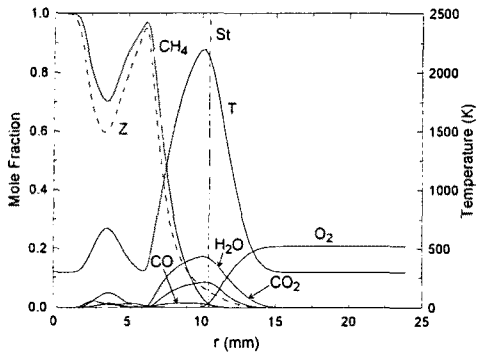


Fig. 5 Isopleth of CO, CO_2 and H_2O concentration of unsteady CH_4/air jet diffusion flame at 0ms

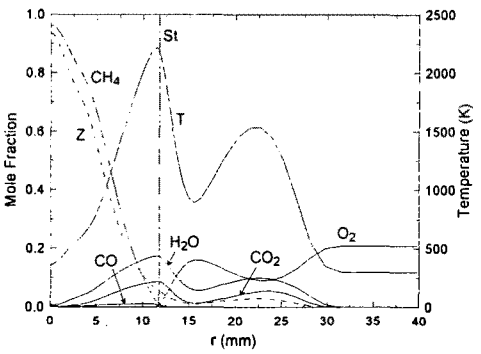
은 화염-와동간의 상호작용(Flame Vortex Interaction)은 화염구조에 있어서도 많은 영향을 주게 되는데 여기에 관해서는 Fig. 6 에서 자세히 설명하겠다.

Fig. 5 에는 비정상 제트 화염에서 발생하는 여러 안정 화학종의 분포를 보기위해 0ms 의 화염에 해당하는 CO, CO_2 및 H_2O 의 농도 등고선을 도시하였다. Fig. 4 에서와 마찬가지로 Fig. 5(a)의 굵은 점선은 양론혼합비 위치 즉, 화염면을 나타낸다. CO 농도분포를 살펴보면, 초기의 화염 안정점 근처에서 최고값을 가지며 하류로 진행할수록 대체적으로 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 전체적으로 CO 는 대부분 화염면 내부에만 분포하는 것을 알 수 있다. CO 가 화염 안정점 근처에서 최고값을 갖는 이유는 본 연구에서 고려한 2 단계 반응기구에서 CO 의 생성에 관여하는 (R1) 반응이 CH_4 와 O_2 가 처음 만나는 화염 안정점에서 반응속도가 매우 높기 때문으로 판단된다. 그러나 본 연구에 사용된 2 단계 총괄 반응기구로 CO 반응을 정확히 예측하는 것은 어렵다고 판단되며, 향후 상세화학반응(Detailed Chemistry)을 고려한 계산을 통해 CO 농도분포에 대해서는 다시 한번 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

다음으로 CO_2 및 H_2O 분포를 살펴보면, 전체적인 농도분포는 Fig. 3 의 온도분포와 매우 유사함을 알 수 있다. 즉, 상류에서는 내부 와동에 의해 영향을 받고 있으며, 하류에서는 외부 와동에 의해 영향을 받아, 화염이 외부로 말리는 위치에서 같이 외부로 말리는 현상을 볼 수 있다. Fig. 5(b), (c)의 농도 등고



(a) x=20mm



(b) x=130mm

Fig. 6 Radial profiles of temperature, major species(CH_4, O_2, CO, CO_2 and H_2O) and mixture fraction at 0ms

선 그림과 Fig.5 (a)의 양론혼합비 선을 비교해 보면, CO_2 및 H_2O 농도의 최고점은 양론혼합비 선상에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 (a), (b)에는 지금까지 언급한 상류 단면과 하류 단면에서의 화염-와동 상호작용을 살펴보기 위해 0ms 의 화염에 대해, 상류단면 중에서 내부 와동과 화염의 간섭이 비교적 강한 20mm 단면과 하류단면 중에서 외부 와동과 화염 간섭이 일어나는 130 mm 단면에 대한 온도, 주요 화학종 농도분포를 도시하였다. 그림에서 점선으로 표시한 것은 혼합분율(Z)을, 세로 일점쇄선은 양론혼합비선을 의미하며, 혼합분율은 아래 식 (10)에 따라 정의[14] 하였다.

$$Z = \frac{\nu Y_F - Y_{O_2} + Y_{O_2,2}}{\nu Y_{F,1} + Y_{O_2,2}} \qquad (10)$$

여기서, $\nu = \nu'_{O_2} W_{O_2} / \nu'_F W_F$ 이며, ν'_F 및 ν'_{O_2} 는 연료와 O_2 의 양론혼합 계수, W_{O_2} 와 W_F 는 분자량을 의미한다.

먼저 Fig. 6(a)의 x=20mm 단면에 대한 결과를 보면, Fig. 5 에서 설명한 것처럼 CO 는 대부분 화염면에서 연료측으로 분포하고 있으며, CO_2 및 H_2O 농도는 양론혼합비선 근처에서 최고치를 보이고 있다. 화염온도 또한 양론혼합비선 근처에서 최고치를 가지나 약간 과농한 쪽으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 가장 특징적인 현상으로서, 연료측에서는 온도 및 각 화학종이 다시 한번 증가하는 영역이 나타나고 있다. 이것은 Fig. 3 에서 설명한 바와 같이 상류의 화염면 내부에서 내부 와동에 의해 화염의 일부가 연료측으로 말리기 때문이며, 이로 인해 CH_4 농도는 중심축에서 반경방향으로 진행하면서 감소하다가 다시 증가하게 되고, CH_4 농도가 감소한 r=3 mm 근처에서는 온도 및 화염대에서 주로 발생한 CO_2 및 H_2O 농도도 다시 증가하게 된다. 연료측의 혼합분율 또한 CH_4 와 분포와 유사하게 감소, 증가의 변곡점을 갖는 형태로 분포하고 있음을 알 수 있다.

다음으로 x=130mm 단면 결과를 살펴보면, CO 분포위치나 화염온도, CO_2 및 H_2O 의 최고점 위치는 x=20mm 단면의 결과와 유사하다. 그러나 외부 와동 말림의 영향으로 온도는 공기측에서 다시 한번 증가하는 경향을 보이고 있으며,

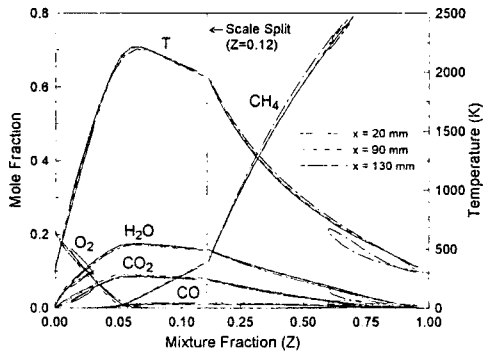


Fig. 7 Temperature and major species(CH_4, O_2, CO, CO_2 and H_2O) concentration in mixture fraction coordinates at 0ms

온도분포의 변곡점이 존재하는 r=15mm 근처에서는 외부의 O_2가 혼입되어 농도가 다시 증가하고 있다. 화염면에서 최고치를 갖는 CO_2, H_2O 도 화염 말림에 의해 공기측에서 다시 농도가 증가하고 있으며, 이러한 경향은 혼합분율 분포에서도 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7 에는 Fig. 6 에서 설명한 내부 와동 및 외부 와동의 영향을 받는 단면과 비교적 와동의 영향이 적은 x=90mm 단면의 화염구조를 혼합분율을 좌표에 대해 함께 나타내었다. 전체적인 분포 경향을 살펴보면, 온도나 CO_2, H_2O 는 양론혼합비인 Z_{st} =0.055 근처에서 최고점을 이루며, CO 도 양론혼합비를 기준으로 연료측에 분포함을 보여주고 있어 앞에서 지금까지 설명한 화염구조를 다시 한번 확인 할 수 있다. 특이한 점으로는 연료측에서 x=20mm 단면의 온도, 및 화학종 농도가 동일 혼합분율에 대해 1 개 이상의 값을 보이고 있으며, 이러한 경향은 공기측의 x=130mm 단면에서도 나타나고 있음을 알 수 있다. 와동에 의한 영향이 약한 x=90mm 단면에서는 이러한 경향은 보이지 않는다. 이와 같이 와동의 영향이 존재하는 각 단면에서 동일 혼합분율에 대해 온도나 화학종 농도값이 편차를 가지고 나타나는 것은 Fig. 6 (a),(b)에서 설명한 것처럼 혼합분율 분포가 와동의 말림에 의해서 단조감소하지 못하고 변곡을 가지며 다시 증가하는 영역이 있기 때문이다. 이러한 것은 화염-와동간의 상호작용이 화염구조에 많은 영향을 미치고 있음을 보여주는 중요한 현상으로서, 향후 이와 유사한 형태의 화염을 이용하여 화염-와동의 상호작용 정도를 적절히 조절한다면, 화염과 와동의 계속적인 상호작용이 존재하는 난류화염의 국소 구조를 이해하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

비정상 CH_4-공기 제트 확산화염에 대한 수치계산 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 노즐 출구 근처에 인위적으로 교란을 주지 않고도 화염이 완전히 노즐에 부착되지 않은 조건에 대한 계산을 수행하여 화염면 내부의 작은 와동 구조에 대한 수치모사가 가능하였다.

(2) 상류의 화염면은 내부 와동에 의해 거의 변형되지 않았으나 하류에서는 외부 와동에 의해 화염면이 수축, 팽창하여 왜곡되고 있음을 알 수 있었다.

(3) CO, H_2O 등의 화학종 분포는 온도분포와 유사한 경향을 보이며, CO 는 화염 안정점에서 농도 최고치를 보이고 있으나, 추후 상세화학반응을 고려한 계산을 통해 검토해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

(4) 와동의 영향이 존재하는 단면에서는

온도 및 화학종 분포가 와동의 영향을 받게 되며, 와동 영역에서는 동일 혼합분율 값에 대해 온도 및 농도값에 편차가 생기고 있음을 알았다.

(5) 본 연구에서 대상으로 한 화염형태를 이용하여 화염-와동의 상호작용 정도를 조절한다면 이러한 현상이 지속적으로 발생하는 난류화염의 구조를 이해하는데 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Akselvoll, K. and Moin, P., 1996, "Large-eddy Simulation of Turbulent Confined Coannular Jets", *J. Fluid Mech.*, Vol. 315, pp. 387~411

(2) Vervisch, L. and Trouve, A., 1998, "LES Modeling for Lifted Turbulent Jet Flames", *Center for Turbulence Research, Proc. of the Summer Program.*

(3) Pope, S. B., 1999, "A Perspective on Turbulence Modeling", *Modeling Complex Turbulent Flows,* (M. D. Salas, Eds.), Kluwer Academic Publishers.

(4) Katta, V. R. and Roquemore, W. M., 1995, "On the Structure of a Stretched /Compressed Laminar Flamelet-Influence of Preferential Diffusion", *Combust. Flame*, Vol. 100, pp. 61~70.

(5) Katta, V. R., Hsu, K. Y. and Roquemore, W. M., 1998, "Local Extinction in an Unsteady Methane-Air Jet Diffusion Flame", *27th Symposium (Int.) on Comb.*, the Comb. Inst., pp. 1121~1129.

(6) Najm, H. N. and Wyckoff P. S., 1997, "Premixed Flame Response to Unsteady Strain Rate and Curvature", *Combust. Flame*, Vol. 110, pp. 92~112.

(7) Kee, R. J., Rupley and F. M, Miller, J. A, 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemkin Kinetics Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", *SAND89-8009B.*

(8) 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 Multicomponent Transport Properties", *SAND86-8246.*

(9) Hirt, C. W. and Cook, J. L., 1972, "Calculating Three-Dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain", *J. Compt. Physics*, Vol. 10, pp. 324~340.

(10) James, S and Madnia, C. K., 1996, "Direct Numerical Simulation of a Laminar Vortex Ring", *Phys. Fluid*, Vol. 8, No. 9, pp. 2400~2414.

(11) Dupont, V., Pourkashanian, M. and Williams, A., 1993, "Modelling of Process Heaters Fired by Natural Gas", *J. Inst. Energy*, Vol. 66, pp. 20-28.

(12) Mitchell, R. E., Sarofim, A. F. and Clomburg, L. A., 1980, "Experimental and Numerical Investigation of Confined Laminar Diffusion Flames", *Combust. Flame*, Vol. 37, pp. 227~244.

(13) Katta, V. R., Goss, L. P. and Roquemore, W. M., 1994, "Simulation of Vortical Structures in Jet Diffusion Flame", *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, Vol. 4, pp. 413~424.

(14) Bray, K.N.C. and Peters, N., 1994, "Laminar Flamelet in Turbulent Flames", *Turbulent Reacting Flows,*(P. A. Libby, F. A. Williams, Eds.), Academic Press.