

CH₄/Air 확산화염에 CO₂ 첨가에 따른 단일 와동의 동적 거동에 관한 수치해석

황철홍** · 오창보* · 이대엽** · 이창언**

A Numerical Study on the Dynamic Behaviors of Single Vortex in a CH₄/Air Diffusion Flame with Addition of CO₂

Chul-Hong Hwang, Chang-Bo Oh, Dae-Yup Lee and Chang-Eon Lee

ABSTRACT

The dynamic behaviors of the single vortex and flame-vortex interaction in a CH₄/Air diffusion flame with addition of CO₂ were investigated numerically. The numerical method was based on a predictor-corrector for low Mach number flow. A two-step global reaction mechanism was adopted as a combustion model. Through comparison of results by effect of CO₂ added either on the fuel or oxidizer side, it was found that the growth of single vortex and entrainment of surrounding fluid by CO₂ addition on the fuel side are larger than those by CO₂ addition on oxidizer side. Also, when CO₂ is added on fuel side, flame-vortex interaction becomes more significant than on air side.

Key Words : Single vortex, Vortical structure, Carbon-dioxide(CO₂), Diffusion flame, Flame-vortex interaction

1. 서 론

지구의 온난화의 주요 원인인 CO₂는 대부분 화석연료의 연소시 발생되는 물질로서, 새로운 연소법을 통한 이들의 저감 및 활용방안에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. CO₂ 저감을 위해서는 연소 시스템의 효율 향상을 통해 연료 사용량을 저감하는 산소부화 연소법이 제안되고 있으며, 이때 산화제 중 산소량의 증가로 인하여 화염온도가 높아지기 때문에 기연가스 중의 CO₂를 재순환하는 방법이 실제 적용되고 있다. CO₂가 연소에 적용되는 또 다른 사례는 NO_x를 저감하기 위해 배기가스를 재순환하는 EGR과 매립지에서 발생되며 약 35% 정도의 CO₂를 함유하고 있는 LFG(Landfill Gas)를 연료로 활용하는 측면에서도 찾아볼 수 있다.

이들 연소법을 실용 연소기에 적용하기 위해서

는 연료 및 산화제에 첨가되는 CO₂가 오염물질과 화염구조 및 안정성에 어떠한 영향을 미치는지에 관한 정보가 요구되어 진다. 기존의 연구로는 Lee[1]와 Han 등[2]이 CO₂ 첨가에 따른 화염구조, 복사효과 및 NO_x 생성특성을 연구하였고, Liu 등[3]은 CO₂ 첨가가 Soot 생성 및 화학반응에 미치는 영향을 검토하였다. 이들 연구의 대부분은 CO₂ 첨가로 인한 희석효과와 열역학적 및 화학적 영향을 주로 검토하였다. 그러나 이들 효과 이외에도 CO₂의 높은 분자량과 전달 물성치로 인한 화염장의 유체역학적인(Hydrodynamic) 효과에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 더 나아가 실제 난류화염에 CO₂가 미치는 영향에 대한 검토는 아직 부족한 실정이다.

이를 위해 여러형태의 난류화염에서 흔히 관찰되는 거대 와구조(Large vortical structure)와 화염과의 상호작용에 관한 이해가 중요시되며, 이들에 관한 많은 연구들은 단순하고 제어가 용이한 와동의 기본구조인 단일 와동에 대해 수행되어져 왔다. 와동과 화염간의 상호작용에 관한 연구는 크게 와동의 동적특성에 관한 연구와 이에

* 인하대학교 대학원 기계공학과

† E-mail : hch5814@korea.com

** 인하대학교 기계공학과

영향을 받는 화염특성에 관한 연구로 나눌 수 있다. 와동에 영향을 받는 화염특성에 관한 연구로서 초기에는 연료와 산화제가 분리된 경계면에 확산화염을 형성하고, 이 화염면에 와동을 생성시켜 혼합층에서의 화염면의 변형 및 와동의 발달에 대해 주로 연구되어졌다.[4, 5] 최근에는 2차원 층류 대향류 화염을 대상으로 단일 와동과의 상호작용을 검토하여 소염 및 비정상 화염거동에 대한 보다 상세한 연구가 이루어지고 있다.[6] 화염과 상호작용하는 와동의 동적특성에 대해서는 James 등[7]에 의해 연료 출구의 형상 및 유속조건에 따른 와동의 생성특성에 대해 보고되었으며, Hewett 등[8]은 주위류의 온도변화에 의해 생성된 확산화염과 상호작용하는 와동의 생성, 전개 및 소멸에 관하여 검토하였다. 확산화염과 와동간의 상호작용에 관한 최근의 연구들은 대부분 에혼합화염과 유사하게 전개되는 와동 외부에 화염면을 형성시키거나, 이미 형성된 화염면이 와동에 의해 전개되는 동안의 거동을 연구하고 있다. 그러나 실제 난류화염에서 쉽게 볼 수 있듯이, 형성된 화염 내부를 통과하면서 상호작용에 의한 와동과 화염특성을 검토하는 것도 복잡한 난류 화염구조를 이해하는데 많은 정보를 제공할 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 연료 및 산화제에 CO₂가 첨가된 CH₄/Air 확산화염을 대상으로 단일 와동을 생성시켜 와동의 동적 특성과 화염-와동간의 상호작용을 검토하고자 한다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구의 계산대상은 Fig. 1에서와 같이 2차원 축대칭 제트 확산화염이다. 유동조건은 음향 유속에 비해 매우 작은 유속을 가지므로 낮은 마하수 근사법(Low mach number approximation) [5]을 적용하면 지배방정식은 식(1)~(5)와 같이 연속, 운동량, 화학종, 에너지 및 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = & -\nabla p_1 + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \\ & + \nabla \cdot \mu \left[(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = & \nabla \cdot (\rho D_{im} \nabla Y_i) \\ & + W_i \dot{\omega}_i, \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = & \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \\ & + \sum_{i=1}^N W_i h_i^0 \dot{\omega}_i + \rho \sum_{i=1}^N (c_{pi} D_{im} \nabla Y_i \cdot \nabla T) \quad (4) \end{aligned}$$

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

여기서, p_0 와 p_1 는 각각 열역학적 압력(Thermodynamic pressure)와 동적 압력(Dynamic pressure)을 의미한다.

본 계산에서는 Soret과 Dufour 효과 및 복사 열전달은 무시하였으며, 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II[9] 및 TRANSFIT Package[10]를 이용하였다.

수치해법으로 지배방정식은 엇갈림 격자계를 이용하여 차분하였으며, 대류항에 대해서 QUICK법, 확산항에 대해서는 2차 정확도의 중앙 차분법을 이용하였다. 열발생에 의한 급격한 밀도변동이 수반되는 반응 유동장에 대해 안정된 해를 얻기 위해서 Najm 등이 제시한, 전체적으로 2차 정확도를 갖는 예측-교정자법을 일부 수정하여 시간 적분을 수행하였으며, 속도와 압력의 교정은 밀도변동을 고려하도록 HSMAC법(Highly Simplified Marker And Cell)을 수정하여 사용하였다.[11]

2.2 계산대상 및 조건

수치계산은 Fig. 1에서와 같이 직경 10mm, 림 두께 0.46mm의 노즐에서 생성되는 CH₄/Air 확산 화염을 대상으로 하였으며, 노즐 출구의 중심을

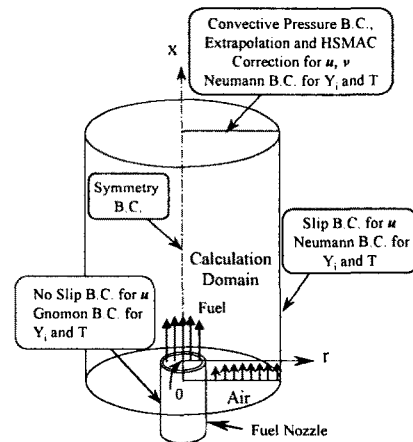


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

Table 1 Initial conditions

Case	Fuel (0.6 m/s)	Oxidizer (0.2 m/s)	Temp_eq (K)
1	$X_{CH_4}=1.0$	$X_{O_2}=0.21$ $X_{N_2}=0.79$	2224.6
2	$X_{CH_4}=0.6$ $X_{CO_2}=0.4$	$X_{O_2}=0.21$ $X_{N_2}=0.79$	2103.9
3	$X_{CH_4}=1.0$	$X_{O_2}=0.196$ $X_{N_2}=0.738$ $X_{CO_2}=0.066$	2103.9

원점으로 하여, $x=-5\sim 80\text{mm}$, $r=0\sim 70\text{mm}$ 의 영역에서 수행되었다. 계산 격자에 대해서는 축방향과 반경방향에 최소 격자간격 $\Delta x=0.2\text{mm}$, $\Delta r=0.15\text{mm}$ 를 가지는 240×160 개의 비균일 격자계를 사용하였다. 격자수의 결정은 비반응 유동장에서 300×200 개 격자계의 결과와 비교하여 전체순환(Total circulation) 및 단면 유속의 오차가 1% 미만이라는 검증을 통해 이루어졌으며, 이 경우에 반응장에 대해서는 화염대의 열 발생에 대해 공간적으로 충분한 정확도를 가짐을 확인하였다.

연료 및 공기류의 조성은 Table 1과 같이 순수 CH_4/Air (Case 1)와 체적비로 연료의 40%에 해당하는 CO_2 를 공급한 경우(Case 2)에 대해 계산을 수행하였으며, Case 3은 Case 2와 동일한 이론평형온도를 갖도록 CO_2 를 주위류에 공급하였다. 연료 및 주위류의 유속은 각각 0.6과 0.2m/s로서 노즐 벽면 근처를 제외하고 균일한 유속을 갖도록 하였으며, 초기 입구의 온도는 298K으로 고정하였다. 그 이외의 경계조건은 Fig. 1에 제시된 바와 같다.

CH_4/Air 의 화학반응을 계산하기 위해서 Dupont 등[12]이 제시한 2단계 총괄반응식을 이용하였으며, 반응에 참여하는 화학종은 CH_4 , CO , CO_2 , H_2O 및 O_2 이며 N_2 는 불활성 기체로서 계산에 포함되었다. 반응개시를 위해서 연료가 충분히 전개된 후, 노즐 출구 하류의 일부 격자에 일시적으로 1,300K의 고온 점화원을 주었다. 이러한 과정을 통해 계산영역 전체에 연료-공기 및 화염이 충분히 전개된 후에 단일 와동을 생성시켰다. 이때 부력에 의해 생성된 화염 벌즈(Flame Bulge)의 영향을 최소화 하기 위해 외부와동이 계산영역을 통과하고 새로운 화염 벌즈가 각 조건에 대해 거의 동일한 위치에 존재할 때 시간에 대해서는 Fig. 2와 같은 속도 프로그램, 공간에 대해서

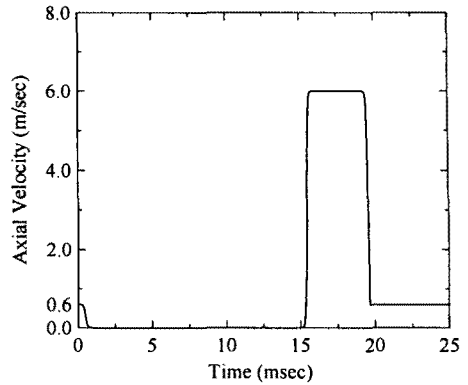


Fig. 2 Velocity program with time

는 Top-hat 형태의 속도조건을 적용하였다.

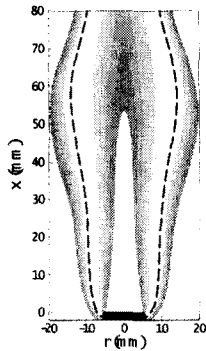
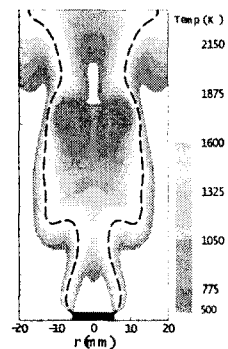
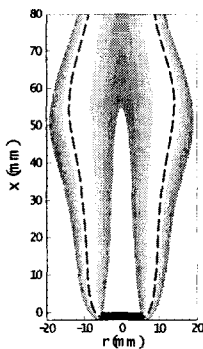
3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 화염장 내에서 단일 와동의 전개특성을 살펴보기 위해 각 조건들에 대해 시간전개에 따른 온도분포를 도시하였다. 각 조건의 그림은 초기 단일 와동 생성전(0.0ms)의 온도분포와, Fig. 2에 제시된 속도 프로그램에 따라 18.75ms부터 5ms 간격으로 진행된 화염을 나타낸다. 온도분포는 500K을 최소값으로 나타내었으며, 굵은 파선은 식(6)으로 정의된 혼합분율로부터 얻은 각 조건의 양론혼합비의 위치로서 본 논문에서는 이 위치를 화염면으로 정의하였다.

$$Z = \frac{\nu Y_F - Y_{O_2} + Y_{O_2,2}}{\nu Y_{F,1} + Y_{O_2,2}} \quad (6)$$

여기서, 하첨자 1과 2는 각각 연료류와 공기류를 의미한다.

Fig. 3의 결과들은 비정상 제트화염의 시간 진행에 따른 단일 와동의 농적 거동을 잘 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 순수 CH_4/Air 의 조성을 갖는 화염으로, 0.0ms에서 부력효과에 의해 화염벌즈가 발생되며, 이는 시간이 진행됨에 따라 하류로 전개되면서 외부와동(Outer Vortex)을 생성시킴을 볼 수 있다. 18.75ms에서는 계속적으로 고속의 유량이 분사되는 시기이므로 단일 와동이 생성되어 화염면에서 생성된 고온의 유체가 와동내부로 말리는 것을 확인할 수 있다. 23.75ms에서는 고속의 유동이 단절되고 초기 유속 0.6m/s로 공급되는 시기로서, 주위 유체의 유입 증가로 인하여 와동의 반경이 증가되며, 와동내부로 500K 이상의 유체가 말림의 형상에 따라 유입되고 있음을 볼 수 있다. 또한 와동의 반경방향으

(a) CH₄/Air Diffusion Flame : 7 contours between 500K and 2250K(b) CH₄+CO₂/Air Diffusion Flame : 7 contours between 500K and 2150K(c) CH₄/Air+CO₂ Diffusion Flame : 7 contours between 500K and 2150K**Fig. 3 Temporal evolution of temperature and flame surface**

로의 팽창으로 인하여 화염면이 크게 신장됨을 알 수 있으나, 국부적인 소염현상은 관찰되지는 않았다. 28.75ms에서는 와동 중심부의 온도가 부분적으로 500K 이상이 되어 혼합이 촉진되고 있음을 알 수 있으며, 고속 유량의 단절로 인한 유동장의 교란으로 와동 후미의 화염면이 내부로 이동함을 알 수 있다. 33.75ms에서는 와동 내부

의 전 영역의 혼합도가 거의 균일함을 온도분포를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3(b)는 연료에 체적비 40%의 CO₂가 혼합된 경우로서, CH₄/Air 경우의 결과와 비교해 보면, 초기 0.0ms에서 CH₄ 연료의 부족으로 인하여 화염면이 상대적으로 내부에 위치함을 알 수 있다. 또한 18.75ms에서는 와동 내부의 500K 이

상의 영역이 더 큰 것으로 보아 주위 유체의 유입이 상대적으로 많아졌음을 알 수 있다. 이 현상은 23.75ms에서 더욱 두드러지는데, 단일 와동은 동일한 유속 프로그램에 의해 생성되었으나 CO₂ 첨가로 인한 연료류 질량의 증가로 모멘텀이 더 커지기 때문으로 예측된다. 이때 와동의 반경 역시 고온 유체의 유입량 증가로 인하여 CH₄/Air 경우에 비해 더 팽창되었음을 확인할 수 있다. 28.75ms에서는 CH₄/Air 경우에 비해 더 빠른 시간에 와동 내부의 온도가 500K 이상으로 상승되었으며, 강한 모멘텀으로 인하여 화염면이 크게 왜곡 되었음을 알 수 있다.

Fig. 3(c)는 CH₄+CO₂/Air 경우와 동일한 이론 평형온도를 갖도록 순수 CH₄ 연료와 산화체에 CO₂를 첨가한 조건의 결과로서, 초기 화염면의 위치는 CH₄/Air의 경우와 유사함을 알 수 있다. 18.75ms에서도 역시 CH₄/Air의 경우와 유사한 온도분포를 보이고 있으나, 23.75ms에서는 와동의 전체적인 형상은 유사하지만 내부의 말림의 정도가 매우 약하다. 28.75ms에서도 역시 다른 조건에 비해 와동 내부로 주위 유체의 말림이 거의 없는 것으로 보아, 상대적으로 높은 질량을 갖는 주위유를 와동 내부로 끌어들이지 못하여 말림에 의한 와동내부의 혼합도가 상대적으로 낮음을 예측할 수 있다. 또한 시간에 따른 화염면의 위치 및 변형의 정도는 CH₄/Air의 경우와 거의 유사한 과정으로 전개된다.

Fig. 4는 각 조건의 시간 진행에 따른 계산영역 전체에서의 최대 및 최소 와도(Vorticity)값을 도시한 것이다. 연료에 CO₂가 첨가된 경우에는 단일 와동의 중심부에 해당되는 와도의 최대값이 전 시간에 걸쳐 다른 조건에 비해 작으며, 와도 최소값 역시 작게 나타난다. CH₄/Air와 CH₄/Air+CO₂의 경우에는 초기에 와도의 최대값은 미소한 차이를 보이나 유사한 값을 가지며, 최소값은 거의 같은 크기임을 알 수 있다.

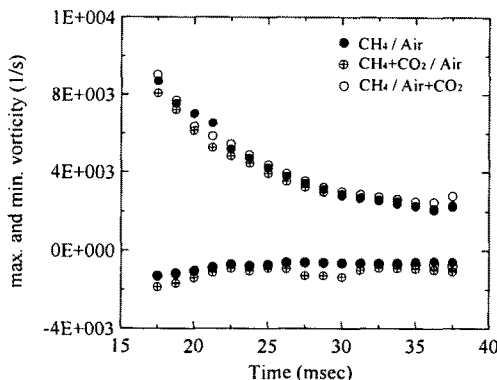


Fig. 4 maximum and minimum vorticity versus time.

Fig. 5는 와동에 의한 전체 유동장의 변화를 예측하기 위하여 와도의 강도를 의미하는 전체 순환(Total circulation)을 시간에 대해 도시한 것으로 이의 정의는 식(7)과 같으며, 전 계산영역에 대한 와도의 적분값을 의미한다.

$$\Gamma = \iint \omega_{\theta} dA \quad (7)$$

단일 와동의 생성 이전에 화염장이 이미 다른 순환값을 가지고 있기 때문에 상대적으로 초기 상태에 대한 변화량을 관찰하기 위해 각 조건의 초기 순환값으로 무차원 하였다. 모든 조건에서 초기 순환이 급격히 증가하며 고속 유동이 단절되는 약 20ms 근처에서 감소하는 경향을 보이고 있다. CH₄/Air와 CH₄/Air+CO₂의 경우에는 Fig. 3에서 확인한 바와 같이 20ms까지는 동일한 거동을 보이나, 이후 공기에 CO₂가 첨가된 경우의 순환값이 점점 작아진다. CO₂가 연료에 첨가된 경우에는 전체 영역에 대한 순환값이 다른 조건에 비해 급격히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 Fig. 4에 나타난 것처럼 최대 와도의 값은 작지만, 고온 유체의 많은 유입으로 인한 와동의 반경 증가로 인하여 상대적으로 큰 와도를 갖는 면적이 많아지기 때문이다. 또한 약 30ms 이후에서 순환값이 불균일한 증가 경향을 보이는 것은 화염과의 왜곡이 가중되는 시기와 일치하는 것으로 보아 화염과의 상호작용에 의한 영향으로 예측된다.

Fig. 5의 전체 순환값은 단지 와도의 강도를 의미하는 반면 CO₂ 첨가로 인한 모멘텀 차이의 영향을 검토하기 위하여 Fig. 6은 수력 임펄스(Hydrodynamic Impulse)를 시간에 대해 도시한 것으로 이의 정의는 식(8)과 같으나, 2차원 축대칭 원통좌표의 경우에는 축방향 만이 유효한 값을 가지므로 식(9)와 같이 유도된다.

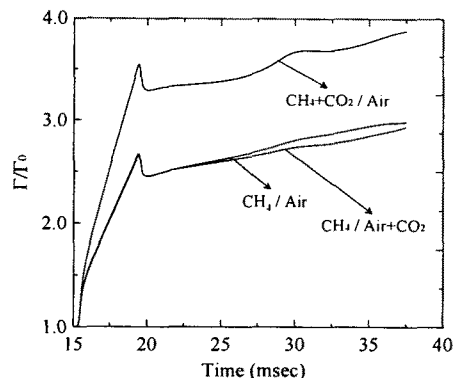


Fig. 5 Evolution of the total circulation versus time

$$I = \frac{1}{2} \int \rho \vec{r} \times \vec{\omega} dV \quad (8)$$

$$I_x = \pi \int \rho \omega_{\theta} r^2 dA \quad (9)$$

Fig. 3에서 나타난 결과와 같이 연료에 CO₂가 혼합된 경우에 가장 큰 임펄스 값을 가지는 것을 볼 수 있으며, 와동 내부의 혼합도이 가장 낮았던 CH₄/Air+CO₂의 경우에는 다른 조건에 비해 수력 임펄스의 값이 작게 계산됨을 확인할 수 있다. 즉 임펄스의 계산을 통해 와동 발달에 의한 주위 유체의 유입량을 상대적으로 짐작할 수 있으며, 이를 통해 와동 내부의 혼합정도를 예측할 수 있다.

Fig. 7은 각 조건에 대한 단일 와동의 반경을 도시한 것으로 와동의 중심에서 와도는 최대값을 가지므로 시간에 따른 와동 중심위치를 추적하여, 그때의 반경을 나타낸 것이다. CH₄/Air와

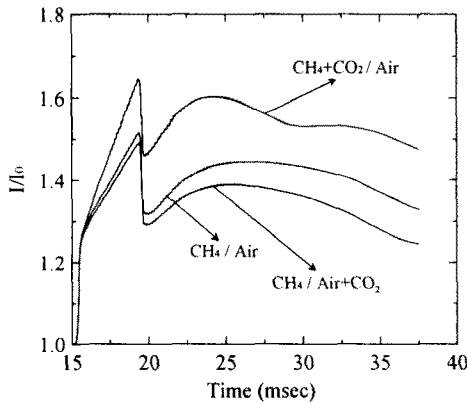


Fig. 6 Evolution of the hydrodynamic impulse versus time

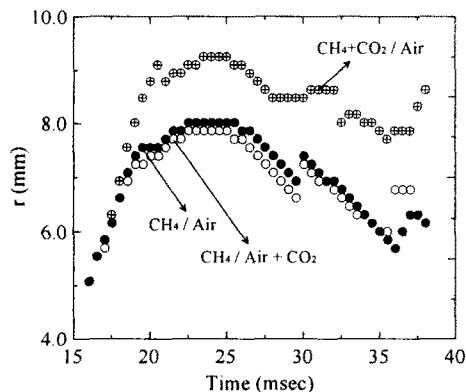


Fig. 7 Radius of the single vortex versus time

CH₄/Air+CO₂의 경우에는 35ms 이후를 제외하고 거의 유사한 와동 반경을 가지는 반면, CH₄+CO₂/Air의 경우에는 고속 유량이 단절되는 약 20ms 이후에서 와동이 하류에 전개되면서 반경이 더욱 커짐을 수치적으로 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급한 결과와 같이 최대 와도의 크기는 CH₄/Air에 비해 작지만, 연료의 큰 모멘텀으로 인한 와동 내부로 고온 유체의 유입량의 증가와 열적 팽창을 통해 반경이 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 각 조건의 이론 혼합비에 해당하는 화염면에서의 스칼라 소산율(Scalar dissipation rate : SDR)과 화염온도를 나타낸 것으로, x축은 화염면의 축방향 위치를 의미하며 스칼라 소산율의 정의는 다음 식(10)과 같다.

$$\chi = 2D \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2 \quad (10)$$

화염면에서의 반응물은 분자확산에 의해서만 화염면에 수송될 수 있으며, 이는 특정 확산시간(Characteristic diffusion time)의 역수를 의미하는 SDR을 통해 해석할 수 있다. 단일 와동의 성장으로 인하여 화염면이 신장되면 화염면의 수직방향으로의 구배가 커지므로 SDR은 증가하게 되며, 이는 반응면으로부터의 분자확산을 증가시킨다. 이때 반응면으로부터의 열전달 또한 증가하게 되며, 동시에 반응을 할 수 있는 체류시간이 감소하므로 온도는 감소하고 화학반응은 보다 불완전해진다.[13] 18.75ms의 Fig. 8(a)에서는 연료에 CO₂가 첨가된 경우에 다른 조건에 비해 와동 반경의 증가로 인해 화염면의 신장이 더욱 커져서 SDR 값이 약 7~8배 정도로 크게 나타나며, 이로 인해 화염온도 역시 가장 낮게 예측되고 있다. 28.75ms에 해당되는 Fig. 8(b)에서도 역시 연료에 CO₂가 첨가된 경우에 SDR 값이 가장 높게 예측되고 있으며, 노즐 근처에서의 온도가 약 600K으로 화염이 부상되었음을 알 수 있다. 물론 본 연구에서 고려한 반응기구는 2단계 총괄 반응기구로서 화염의 정확한 부상거동을 예측하기는 다소 어려움이 있다. 그러나 CO₂를 산화제에 첨가한 경우에 비해서 연료에 첨가한 경우가 실제 난류 화염에서 화염의 불안정성을 더욱 초래할 것으로 기대되어 진다. 또한 CH₄/Air와 CH₄/Air+CO₂의 경우에 화염온도는 약 200K 정도의 차이를 보이고 있으나, SDR 값은 화염면 전체에 대해 거의 같은 값을 가지는 것으로 보아 산화제에 포함된 CO₂가 화염에 미치는 영향은 상대적으로 작음을 확인할 수 있다.

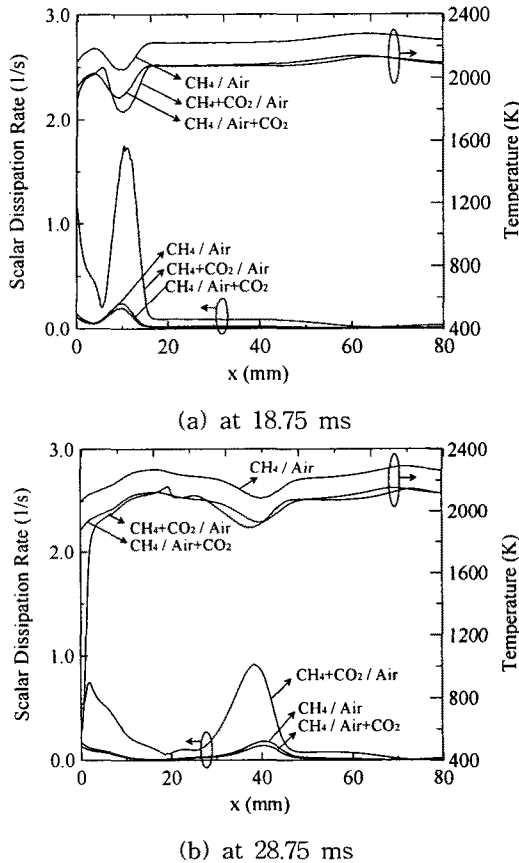


Fig. 8 Scalar dissipation rate and temperature on flame surface with axial distance

4. 결론

본 연구에서는 연료 및 산화제에 CO_2 가 첨가된 CH_4/Air 제트 확산화염을 대상으로 단일 와동의 동적특성과 화염-와동간의 상호작용에 관한 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

단일 와동 내부의 온도분포를 통해 연료에 CO_2 가 첨가된 경우의 혼합도가 CH_4/Air 와 $\text{CH}_4/\text{Air}+\text{CO}_2$ 의 경우에 비해 매우 큼을 확인하였다. 실제 화염장에서 최대 와도의 크기는 다른 조건에 비해 작지만, 연료류의 큰 질량에 의한 모멘텀으로 인하여 주위 유체의 유입이 증가되며, 결국 와동의 반경이 크게 증가됨을 알 수 있었다. 화염에 미치는 영향으로는 큰 모멘텀을 가지는 와동의 전개에 따라 화염면의 왜곡이 더욱 가중되며, 와동 반경의 증가에 따라 화염면이 더욱 신장되어 다른 조건에 비해 스칼라 소산율이 약 7~8배 정도로 높게 예측되었다. 산화제에 CO_2 를 첨가한 경우에는 와동 내부의 혼합정도가 낮으며, 화염에 미치는 영향 역시 매우 작음을 확인

하였다. 그 결과 실제 난류화염에서는 연료측에 CO_2 가 첨가된 경우 화염면의 불안정성이 더욱 크게 작용될 것으로 예측된다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(Combustion Engineering Research Center : CERC)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] C. E. Lee, S. R. Lee, J. W. Han and J. Park, "Numerical study on effect of CO_2 addition in Flame Structure and NO_x formation of CH_4 -air counterflow diffusion flames," *Int. J. Energy Research*, Vol. 24, 2000, pp. 2-12.
- [2] 한지웅, 이창언, "산화제 제어 확산화염의 화염구조 및 NO 생성 특성에 관한 수치해석적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, 제26권 제5호, 2002, pp. 742-749.
- [3] F. Liu, H. Guo, G. J. Smallwood and O. L. Gulder, "The chemical effects of carbon dioxides as an additive in an ethylene diffusion flame : implications for soot and NO_x formation," *Combust Flame*, Vol. 125, 2001, pp. 778-787.
- [4] F. E. Marble, "Growth of a diffusion flame in the field of a vortex," *Recent Advances in the Aerospace Science*, pp. 395.
- [5] P. A. McMurtry, W. H. Jou, J. J. Riley and R. W. Metcalfe, "Direct numerical simulations of a reacting mixing layer with chemical heat release," *AIAA Journal*. Vol. 24, No. 6, 1985, pp. 962-970.
- [6] V. R Katta and W. M. Roquemore, "Response of hydrogen-air opposing-jet diffusion flame to different types of perturbations," *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 2055-2062.
- [7] S. James and C. K. Madnia, "Direct numerical simulation of a laminar vortex ring," *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 9, 1996, pp. 2400-2414.
- [8] J. S. Hewett and C. K. Madnia, "Flame-vortex interaction in a reacting vortex ring," *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 1, 1998, pp. 189-205.
- [9] R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II," SAND89- 8009B.
- [10] R. J. Kee, G. D. Lewis, J. Warnatz, E.

Coltrin, J. A. Miller, "Tranfit package," SAND 86-8246.

[11] 오창보, 이창언, "비정상 CH₄/공기 제트 확산화염에 관한 수치모사," 대한기계학회논문집 B 권, 제25권 제8호, 2001, pp. 1087-1096.

[12] V. Dupont, M. Pourkashanian and A. Williams, "Modelling of process heaters fired by natural gas," Institute of Energy, Vol. 66, 1993, pp. 20-28.

[13] N. Peters, "Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion," Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 10, 1984, pp. 319-339.