

## CH<sub>4</sub>-공기 제트 확산화염에서 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 단일 와동의 동적거동에 관한 연구

황철홍\* · 오창보\* · 이대엽\*\* · 이창언†

(2002년 12월 18일 접수, 2003년 7월 4일 심사완료)

### An Investigation on Dynamic Behaviors of Single Vortex with CO<sub>2</sub> Dilution in a CH<sub>4</sub>-Air Jet Diffusion Flame

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

**Key Words :** Vortex(와동), Flame-Vortex Interaction(화염-와동간의 상호작용), CO<sub>2</sub> Dilution(이산화탄소 희석), Diffusion Flame(확산화염)

#### Abstract

The dynamic behaviors of the single vortex interacting with CH<sub>4</sub>-Air jet diffusion flame are investigated numerically. The numerical method is based on a predict-corrector scheme for a low Mach number flow. A two-step global reaction mechanism is adopted as a combustion model. Studies are conducted in fixed initial velocities for the three cases according as where CO<sub>2</sub> is added; (1) without dilution, (2) dilution in fuel stream and (3) dilution in oxidizer stream. A single vortex is generated by an axisymmetric jet, which is made by an impulse of a cold fuel when a flame is developed entirely in a computational domain. The simulation shows that CO<sub>2</sub> dilution in fuel stream results in somewhat larger vortex radius, and greater amount of entrainment of surrounding fluid than in other cases. Thus, the dilution of CO<sub>2</sub> in fuel stream enhances the mixing in single vortex and increases the stretching of the flame surface. The budgets of the vorticity transport equation are examined to reveal the mechanism of vortex formation when CO<sub>2</sub> is added. It is found that, in the case of CO<sub>2</sub> dilution in fuel stream, the vortex destruction due to volumetric expansion and the vortex production due to baroclinic torque are more dominant than in other cases.

#### 기호설명

$u$  : 혼합기 유속  
 $g$  : 중력가속도  
 $U$  : 단위 텐서(Unit tensor)  
 $Y_i$  : 화학종  $i$ 의 질량분율  
 $c_p$  : 혼합기의 정압비열  
 $c_{pi}$  : 화학종  $i$ 의 정압비열  
 $W_i$  : 화학종  $i$ 의 분자량  
 $p_0$  : 열역학적 압력(Thermodynamic pressure)

$p_1$  : 동적 압력(Hydrodynamic pressure)  
 $D_{im}$  : 혼합기 평균확산계수(Mixture-averaged diffusion coefficient)  
 $R_0$  : 일반기체상수(Universal gas constant)  
 $h_i^0$  : 화학종  $i$ 의 생성열(Heat of formation)  
 $T$  : 온도  
 $t$  : 시간  
 $\Delta x$  : 축방향 격자거리  
 $\Delta r$  : 반경방향 격자거리  
 $\Delta t$  : 시간 전진 간격

\* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 인하대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7323 FAX : (032) 868-1716

#### 그리스문자

$Z$  : 혼합분율(Mixture fraction)  
 $\Gamma$  : 전체순환(Total circulation)  
 $I$  : 수력 임펄스(Hydrodynamic impulse)

- $\rho$  : 혼합기의 밀도
- $\omega_\theta$  :  $\theta$  방향의 와도(Vorticity)
- $\dot{\omega}_i$  : 화학종  $i$ 의 단위체적 당 몰생성률
- $\mu$  : 혼합기의 점성계수
- $\lambda$  : 혼합기의 열전도계수
- $\nu$  : 산화제와 공기의 양론혼합 질량비율

1. 서론

화석연료의 연소에 의해 발생하는 CO<sub>2</sub>는 지구 온난화를 초래하는 중요 물질로 부각되어 있으며, 연소 시스템의 효율상승을 통한 CO<sub>2</sub> 저감 방안에 대해 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 이 중 산소부화 연소법<sup>(1)</sup>은 반응물 중의 산소농도(즉 산소부화율)가 높을수록 화염온도가 높아지기 때문에, CO<sub>2</sub>를 포함한 배기가스를 연료 혹은 산화제측에 재순환하여 화염온도를 조절해야 한다. 이와 같이 CO<sub>2</sub>가 연료 혹은 산화제에 혼합되어 연소되는 사례들로, 엔진에서 NO<sub>x</sub>를 저감하기 위한 EGR (Exhaust Gas Recirculation) 연소법, 폐기물 매립지에서 발생하는 매립지 가스(Landfill gas)<sup>(2)</sup> 혹은 석탄가스 등을 연료로 사용하는 경우를 들 수 있다. 위와 같이 연료 혹은 산화제에 CO<sub>2</sub>가 첨가된 경우, 이 CO<sub>2</sub>는 연소장의 유동 및 반응과정을 변화시켜 결과적으로 화염구조, 안정성 및 NO<sub>x</sub>, CO, Soot 등과 같은 오염물질 생성에 많은 영향을 미칠 것으로 여겨진다.

CO<sub>2</sub>가 연료 혹은 산화제에 혼합된 효과에 대한 기존의 연구로서, Bac 등<sup>(3)</sup>은 종류 동축 화염을 대상으로 첨가된 CO<sub>2</sub>가 화염의 안정성에 미치는 영향에 대해 검토하였고, Saito 등<sup>(4)</sup>은 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 소염특성에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Lee 등<sup>(5)</sup>과 Han 등<sup>(6)</sup>은 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 화염구조 및 NO<sub>x</sub> 생성특성을 연구하였고, Liu 등<sup>(7)</sup>은 CO<sub>2</sub> 첨가가 Soot 생성에 미치는 영향을 검토하였다. 이들 연구의 대부분은 주로 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 현상변화에 주목하고 있으며, 그 원인은 주로 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 열적 효과(Thermal effect) 및 반응 효과(Chemistry effect)의 변화에 기인하는 것들이다. 그러나 이들 효과 이외에도 CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 분자량과 전달 물성치의 변화로 인하여 유동인자가 변화되며, 이 변화는 결국 화염면 주변의 유동, 혼합 및 반응에 많은 변화를 초래할 것이다. 특히 난류 화염에서는 CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 유동 및 반응과정의 변화가 더욱 중요시되며, 이들의 변화가 제반 연소특성에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 CO<sub>2</sub>가 연료 혹은 산화제 중에서 어느쪽에 혼

합되어 있는가에 따라서도 그 영향은 다를 것으로 예측된다. 그러나 이들에 대한 상세한 정보는 부족한 형편이다. 난류화염에서 CO<sub>2</sub> 첨가가 화염에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 난류화염의 해석 방법인 화염과 와동간의 상호작용에 대한 이해가 필수적이다. 이러한 화염과 상호작용하는 와동의 특성은 일반적으로 와동의 기본구조인 단일 와동을 대상으로 수행되어져 왔다.<sup>(8,9)</sup>

이와 같은 배경 하에 본 연구에서는 연료 혹은 산화제에 CO<sub>2</sub>가 첨가된 CH<sub>4</sub>-Air 확산화염을 대상으로, 연료 노즐측에 단일 와동을 생성시켜 화염과 상호작용하는 와동의 동적거동을 검토하고자 한다. 이는 CO<sub>2</sub>가 첨가된 실제 난류화염의 여러 연소특성을 이해하는데 필요한 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구의 대상은 Fig. 1과 같은 2차원 축대칭 제트 확산화염이다. 유동조건은 음향유속에 비해 매우 작은 유속을 가지므로 낮은 마하수 근사법(Low mach number approximation)<sup>(10)</sup>을 적용하면 지배방정식은 식 (1)~(5)와 같은 연속, 운동량, 화학종, 에너지 및 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

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

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p_i + (\rho - \rho_0) \mathbf{g}$$

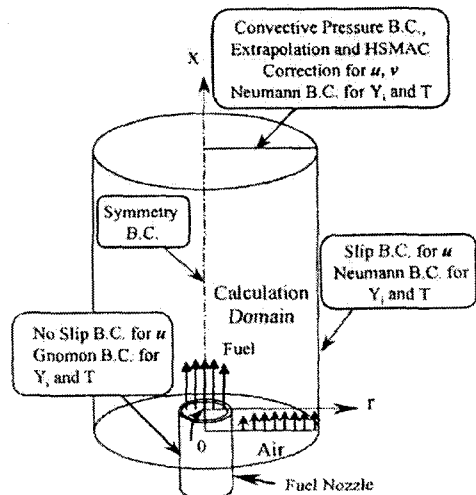


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

$$+\nabla \cdot \mu \left[ (\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{U} \right] \quad (2)$$

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

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

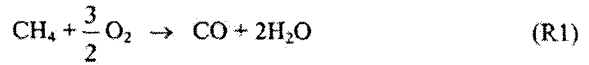
$$p_0 = \rho R_0 T \sum_{i=1}^N \left( \frac{Y_i}{W_i} \right) \quad (5)$$

본 연구에서는 Soret과 Dufour 효과 및 복사 열전달은 무시하였으며, 위 방정식 중에서 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II<sup>(11)</sup> 및 TRANFIT package<sup>(12)</sup>를 이용하여 계산하였다.

수치계산법으로 지배방정식은 엇갈림 격자계를 이용하여 차분하였으며, 대류항에 대해서 QUICK 법, 확산항에 대해서는 2차 정확도의 중앙차분법을 이용하였다. 열발생에 의한 급격한 밀도변동이 수반되는 반응 유동장에 대해 안정된 해를 얻기 위해서 Najm 등이 제시한, 전체적으로 2차 정확도를 갖는 예측-교정자법(Predictor-corrector method)<sup>(13)</sup>을 일부 수정하여 시간적분을 수행하였으며, 속도와 압력의 교정은 밀도변동을 고려하도록 HSMAC 법(Highly Simplified Marker And Cell)<sup>(14)</sup>을 수정하여

사용하였다. 수치계산에 대한 자세한 내용은 참고 문헌 (15)를 참고하기 바란다.

CH<sub>4</sub>-Air의 반응기구로 Dupont 등<sup>(16)</sup>이 제시한 2단계 총괄 반응식을 이용하였다. 화염과 상호작용하는 와동 특성의 변화는 일반적으로 상세한 반응보다는 화염대 근처의 열 발생에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서 적용한 2단계 총괄 반응식은 CO<sub>2</sub> 첨가에 의한 와동의 동적특성을 검토하는데 적합하리라 판단된다.<sup>(10)</sup> 반응에 참여하는 화학종은 CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 및 O<sub>2</sub>와 불활성 기체인 N<sub>2</sub>를 포함한 6개의 화학종이 고려되었다. 이용된 화학반응식과 반응속도(Reaction rate)는 다음과 같다.



$$RR_1 = 10^{10.0} \exp\left(\frac{-12,019}{T}\right) [\text{CH}_4]^{1.0} [\text{O}_2]^{1.0} \quad (6)$$

$$RR_2 = 10^{10.0} \exp\left(\frac{-12,019}{T}\right) [\text{CO}]^{1.0} [\text{O}_2]^{1.0} \quad (7)$$

여기서, [ ]은 화학종의 몰농도 (kmole/m<sup>3</sup>)를 나타낸다.

## 2.2 계산조건 및 절차

수치계산은 Fig. 1에서와 같이 내경 10mm, 림두께 0.46mm의 노즐에서 생성되는 CH<sub>4</sub>-Air 확산화염을 대상으로 하였으며, 노즐 출구의 중심을 원점으로 하여, x=5~80mm, r=0~70mm의 영역에서 수행되었다.

초기 입구 경계조건으로 연료 및 주위류의 평균유속은 각 0.6m/s와 0.2m/s로 하였으며, 연료노즐 출구의 속도분포는 벽면 근처를 제외하고 균일한 속도분포(Top-hat profile)를 갖도록 식 (8)과 같은 속도분포를 주었다. 주위류 역시 노즐 근처를 제외하고는 균일한 속도분포를 갖도록 하였다.

$$U = \bar{U} \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \tanh \left\{ 10 \left( \frac{r}{R} - 1 \right) \right\} \right] \quad (8)$$

여기서  $r$ 은 반경방향 거리,  $R$ 은 노즐반경,  $\bar{U}$ 는 연료노즐 출구의 평균유속을 의미한다. 그리고 입구에서 연료 및 주위류의 공급온도는 298K로 고정하였다. 그외 경계조건으로는 Fig. 1에 나타낸

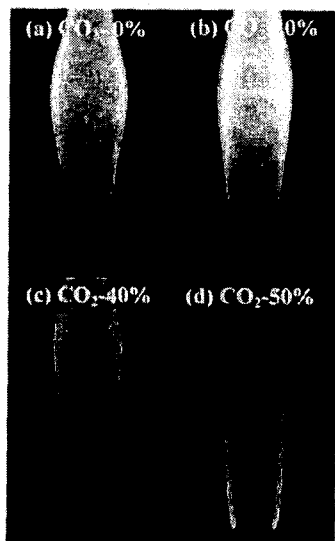


Fig. 2 Instantaneous flame shape with CO<sub>2</sub> addition in fuel stream by direct photography

바와 같이 속도에 대해서는 중심축에서 대칭조건, 반경방향의 외부 경계 및 노즐 벽면에 대해 각각 Slip 조건과 No slip조건을 주었다. 또한 각 경계에서 화학종과 온도에 대해서는 Neumann 조건을 부여하였으며, 출구 경계에서는 압력에 대한 대류 경계조건과 외삽법을 이용한 속도 경계조건을 부여하였으며, 경계에 접한 각 단위격자마다 HSMAC 법에 의한 속도-압력 교정을 수행하고, 전 계산영역 및 국소격자에서 연속방정식을 만족하도록 하였다.

계산에서 연료 및 주위류에 첨가되는 CO<sub>2</sub>의 양을 결정하기 위해, Fig. 2는 수치계산과 동일한 조건에서 수행된 연료 중 CO<sub>2</sub>의 첨가비율에 따른 화염 형상을 나타낸 것이다. CO<sub>2</sub>의 첨가비율이 증가할수록 청염이 되면서 CO<sub>2</sub> 첨가효과가 두드러지나, 첨가비율이 50%가 되면 화염이 약간 부상하면서 불안정해진다. 본 계산에서는 체적비로 40%의 CO<sub>2</sub>가 연료에 첨가된 경우를 계산조건으로 선정하였다. 이 기준화염은 Fig. 2 (c)와 같이 안정하면서, 외부로 팽창된 화염벌지(Flame bulge) 부분을 제외하고는 대부분 청염으로, CO<sub>2</sub>의 첨가 효과가 명확한 경우임을 알 수 있다. 각 계산 경우에 대한 자세한 조건은 Table 1에 제시되었다. Case

1은 순수 CH<sub>4</sub>-Air 조성의 경우이며, Case 2는 체적비로 40%의 CO<sub>2</sub>가 연료에 혼합된 경우이다. Case 3은 화염에 의해 생성된 열이 와동에 미치는 영향을 Case 2와 동일시 하기 위해, 화염 단일 평형온도가 Case 2와 동일하게 되도록 CO<sub>2</sub>를 주위류에 공급한 경우이다.

화염은 연료가 충분히 전개된 후, 노즐 출구 하류의 일부 격자에 일시적으로 1300K의 고온 점화원을 주어 착화하였다. 그리고 계산영역 전체에 화염이 완전히 형성되는 준 정상상태에서 단일 와동을 생성시켰다. 본 계산에서는 단일 와동의 전개 및 화염과의 상호작용을 유사한 조건에서 살펴 보기 위해 외부 와동(Outer vortex)이 계산영역을 완전히 통과하는 순간을 준 정상상태로 가정하였다. 그리고 단일 와동은 각 조건의 준 정상상태에서 연료 노즐의 평균유속을 Fig. 3의 시간에 따른 속도 프로그램과 같이 변화시켜 생성시켰다. 즉 초기 0.6m/s에서 0.0m/s로 약 15ms 동안 연료 공급을 중단한 후, 단일 와동을 생성하기 위해 6.0

Table 1 Inflow boundary conditions

Case	Fuel (mole fraction)	Oxidizer (mole fraction)	Adiabatic Temp.(K)
1	$x_{CH_4} = 1.0$	Air (O <sub>2</sub> :0.21, N <sub>2</sub> :0.79)	2246.6
2	$x_{CH_4} = 0.6$ $x_{CO_2} = 0.4$	Air	2103.9
3	$x_{CH_4} = 1.0$	Air+CO <sub>2</sub>	2103.9

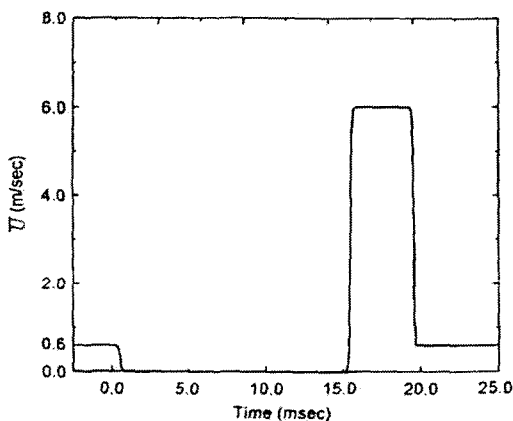
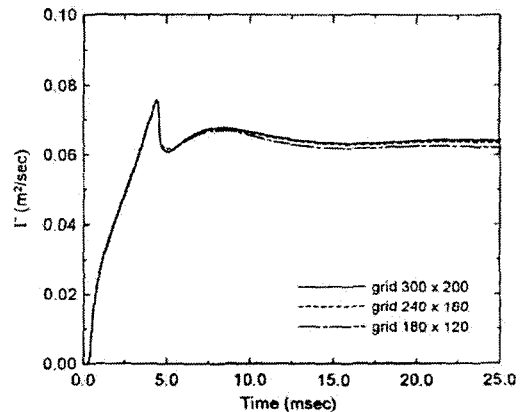
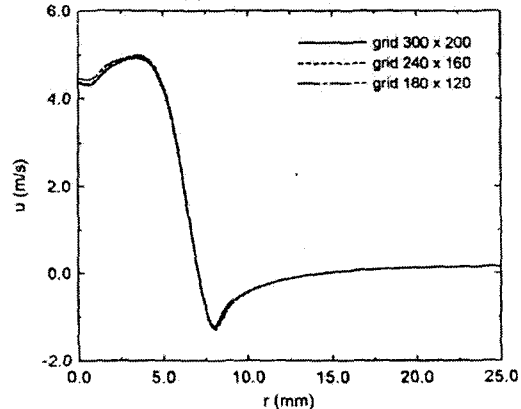


Fig. 3 Velocity program at fuel nozzle exit for generation of single vortex



(a) Total circulation



(b) Axial velocity on x=30mm at 15msec

Fig. 4 Comparisons of (a) the total circulation and (b) the axial velocity with the number of grid for non-reacting CH<sub>4</sub>-Air flow

m/s의 고속유량을 5ms동안 분사한 후에 다시 초기 유속인 6m/s로 연료를 공급하였다.

본 계산의 격자 해상도를 결정하기 위하여 비반응 CH<sub>4</sub>-Air조건에서  $N_x \times N_r = 180 \times 120, 240 \times 160$  및  $300 \times 200$ 의 격자계에 대해 각각 계산을 수행하였다. 계산은 초기상태에서 Fig. 3의 15ms의 조건을 0ms로 가정하여 단일 와동을 생성하였으며, Fig. 4는 식 (10)에서 설명되는 전체순환(Total circulation)과 15ms에서  $x=30\text{mm}$  단면의 축방향 속도를 각 격자계에 대해 비교한 것이다.  $240 \times 160$  격자수의 결과와  $300 \times 200$ 의 경우를 비교할 때 Fig. 4(a)의 전체순환은 최대오차가 0.97%이며, Fig. 4(b)의 단면 유속의 최대오차는 0.77%로 두 경우 모두 1.0% 미만임을 알 수 있다. 또한 이 격자계를 통한 반응장의 계산에서도 화염대의 급격한 열 생성율에 대해 공간적으로 충분한 정확도를 가짐을 확인하였다. 그러므로 본 연구에서는 최소 격자간격  $\Delta x=0.2\text{mm}$ ,  $\Delta r=0.15\text{mm}$ 를 갖는  $240 \times 160$  개의 비균일 격자계를 사용하였다. 그리고 전 계산과정에서 시간의 전진 간격은  $5\mu\text{s}$ 로 일정하게 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 단일 와동의 동적특성

Fig 5는 CO<sub>2</sub>가 연료 혹은 주위류에 포함된 경우의 비정상 제트화염에서 시간 진행에 따른 단일 와동의 동적거동 및 혼합특성을 나타낸 것이다. 각 그림은 준 정상상태(0.0ms)와 Fig. 3에 제시한 와동 생성 속도 프로그램에서 와동 생성 직후(18.75ms)부터 5ms 간격으로 화염 온도분포를 나타낸 것이다. 온도분포는 500K이상의 값만을 나타내었으며, 굵은 파선은 식 (9)로 정의된 혼합분율로부터 얻은 양론혼합비의 위치로서, 본 논문에서는 이 위치를 화염면으로 정의하였다.

$$Z = \frac{vY_F - Y_{O_2} + Y_{O_2,2}}{vY_{F,1} + Y_{O_2,2}} \quad (9)$$

여기서, 하첨자 1과 2는 각각 연료류 및 주위류를 의미한다.

Fig. 5(a)는 CO<sub>2</sub>가 포함되지 않은 순수 CH<sub>4</sub>-Air 화염이다. 우선, 부력효과에 의해 생성된 화염 별즈는 시간 진행에 따라 하류로 전개되면서 외부와동을 생성시킴을 확인할 수 있다. 단일 와동의 거동을 살펴보면, 18.75ms의 경우는 고속의 유량이

분사되는 시기로 단일 와동이 생성되면서 화염면 주변의 고온 유체가 와동 내부로 말리기 시작하는 것을 볼 수 있다. 23.75ms의 그림은 고속의 유량이 단절되고 다시 초기 유속인 0.6m/s로 공급되는 시기로 와동 반경이 증가하며, 와동 말림에 의해 와동 내부로 고온의 유체가 유입되고 있음을 알 수 있다. 또한 와동이 팽창되면서 화염면이 크게 신장되지만, 이 경우에 국부적인 소염현상이 관찰되지는 않았다. 28.75ms에서는 와동 중심부의 온도분포가 점점 균일화되어 혼합이 촉진되고 있음을 알 수 있다. 또한 고속 유량의 순간적인 단절로 인한 유동장의 교란으로 와동 후미의 화염면이 내부로 이동됨을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 전체 연료류에 체적비 40%의 CO<sub>2</sub>를 포함한 경우로서, 준 정상상태의 화염은 CO<sub>2</sub> 첨가에 의한 연료의 희석으로 인하여 화염면이 상대적으로 내부에 위치함을 알 수 있다. 단일 와동의 거동을 CH<sub>4</sub>-Air 조건과 비교해 보면, 18.75ms와 23.75ms에서 와동 내부로 고온 유체의 유입량이 많아지며 와동 반경도 더 팽창되었음을 확인할 수 있다. 이 현상은 CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 연료류의 밀도 증가로 와동의 운동량이 더 커지기 때문으로 예측된다. 28.75ms에서는 CH<sub>4</sub>-Air 조건에 비해 더 짧은 시간에 와동 내부의 온도가 500K 이상으로 상승되었으며, 큰 운동량으로 인하여 화염면이 크게 왜곡되어, 이를 통해 화염과의 상호작용이 더욱 강하게 작용됨을 짐작할 수 있다.

Fig. 5(c)는 주위류에 CO<sub>2</sub>를 첨가한 경우로, 준 정상상태의 화염면의 위치는 CH<sub>4</sub>-Air의 경우와 유사함을 알 수 있다. 이는 Table 1의 CH<sub>4</sub>-Air경우와 비교해 단열 화염온도는 약 140K차이가 나지만, 주위류에 첨가되는 CO<sub>2</sub>의 물분율이 0.066으로 매우 작아서 실제 화염면이 존재하는 이론 혼합분율의 값 차이가 미소하기 때문이다. 18.75ms에서도 역시 CH<sub>4</sub>-Air 조건과 유사한 온도분포를 보이고 있으나, 23.75ms와 28.75ms에서는 와동의 전체적인 형상은 유사하지만 와동 내부로 주위 유체의 말림이 매우 약함을 볼 수 있다. 즉 상대적으로 높은 질량을 갖는 주위류를 와동 내부로 끌어들이지 못하여, 말림에 의한 와동 내부의 혼합도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 또한 시간에 따른 화염면의 위치 및 변형의 정도는 CH<sub>4</sub>-Air의 경우와 유사한 과정으로 전개됨을 볼 수 있다.

Fig. 6은 연료 및 주위류에 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 단일 와동의 반경을 시간에 따라 도시한 것으로, 와동은 중심부에서 최대의 와동을 가지므로 시간에 따른 와동 중심위치를 추적하여 그때의 반경을 나타낸 것이다. CH<sub>4</sub>-Air와 CH<sub>4</sub>-Air+CO<sub>2</sub>의 경우에는

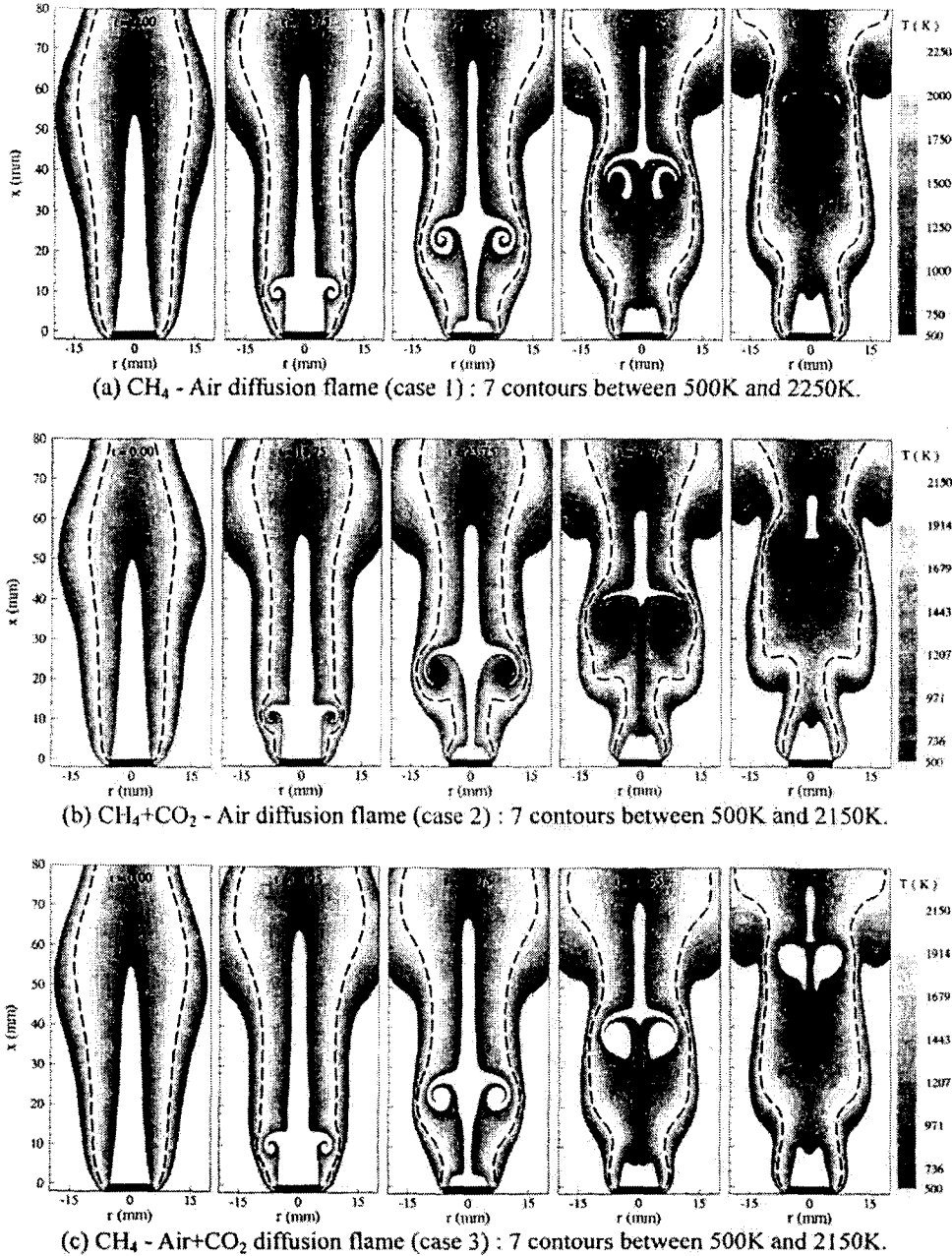


Fig. 5 Temporal evolutions of temperature and flame surface for (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3

Fig. 5에서 보았듯이 와동 내부에 주위 유체 유입에 의한 혼합정도의 차이로 인하여 CH<sub>4</sub>-Air+CO<sub>2</sub> 경우에 와동 반경이 다소 작으나, 시간에 따른 전체적인 거동은 매우 유사함을 볼 수 있다. 또한 28.75ms 근처에서는 와동 반경의 크기가 다소 감소하는데, 이는 부력에 의해 발생하는 외부 와동에 의해 화염면이 안쪽으로 이동하여 열 확산대(Diffusive thermal layer)의 폭이 감소하고, 외부 와동이 접근하는 단일 와동의 선단과 반대 방향으로 회전하기 때문에 결과적으로 단일 와동의 성장을

억제하는 것으로 사료된다. 연료에 CO<sub>2</sub>가 첨가된 경우에는 다른 조건과 비교하여 와동 반경이 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5에서 언급한 결과와 같이 연료류의 큰 운동량으로 인한 와동 내부로 고온 유체의 유입량의 증가와 이로 인한 열적 팽창에 의한 것이다. 이때 화염면은 더욱 크게 신장되기 때문에 다른 조건에 비해 화염에 미치는 영향이 클 것으로 예측된다.

Fig. 7은 시간에 따른 전 계산영역에서 와도(Vorticity)의 최대 및 최소값을 도시한 것이다. 단

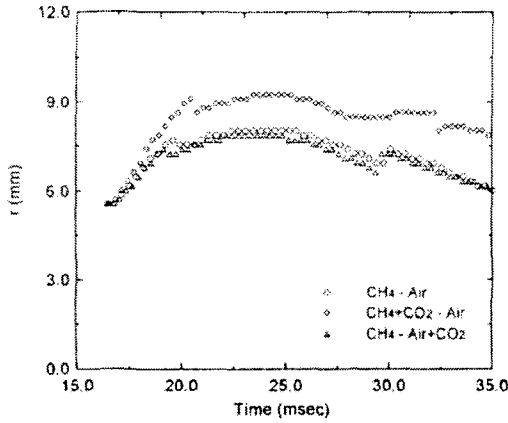


Fig. 6 Radius of single vortex with time

일 와동 생성초기에 와도는 최대값을 가지며 시간에 따라 점점 감소하는 경향을 보인다. CH<sub>4</sub>-Air와 CH<sub>4</sub>-Air+CO<sub>2</sub>의 경우에 와도의 최대 및 최소값은 미소한 차이를 보이지만, 전체적으로 유사한 크기를 가짐을 알 수 있다. 그러나 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>-Air의 경우에 와도의 최대 및 최소값이 다른 조건에 비해 작게 나타나며, 시간에 따라 더욱 불규칙한 거동을 보이고 있다. 이를 통해 CO<sub>2</sub>가 첨가된 경우에 유동장의 변화가 더욱 큼을 예측할 수 있다.

CO<sub>2</sub>가 연료에 첨가된 경우에 국부적으로 다른 조건에 비해 와도의 최대값은 작으나, 비교적 큰 와도를 갖는 단일 와동의 반경은 크기 때문에 유동장 전체에 미치는 영향을 보다 명확하게 언급할 필요가 있다. 따라서 전체 영역에서 와도의 강도 및 운동량 차이에 의한 영향을 Fig. 8~9에 도시하였다.

Fig. 8은 각 조건에서 발생된 와동이 전체 유동장에 미치는 강도를 예측하기 위하여 전체순환(Total circulation)을 시간에 대해 도시한 것으로 이의 정의는 식 (10)과 같으며, 전 계산영역에 대한 와도의 적분값을 의미한다.

$$\Gamma = \iint \omega_\theta dA \quad (10)$$

단일 와동의 생성 이전에 유동장이 이미 전체순환값을 가지고 있기 때문에 단일 와동에 의한 영향을 관찰하기 위하여 각 조건의 초기 전체순환값으로 무차원하였다. 모든 조건에서 와동 생성시기에 전체순환이 급격히 증가하며 고속 유동이 단절되는 약 20ms 근처에서 감소하는 경향을 보이고 있다. CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>-Air의 경우에 전체순환값의 최대값은 다른 조건에 비해 약 60% 더 크며, 급격히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 Fig. 6과 7의 와동 반경과 와도의 최대 및 최소값으로 설명

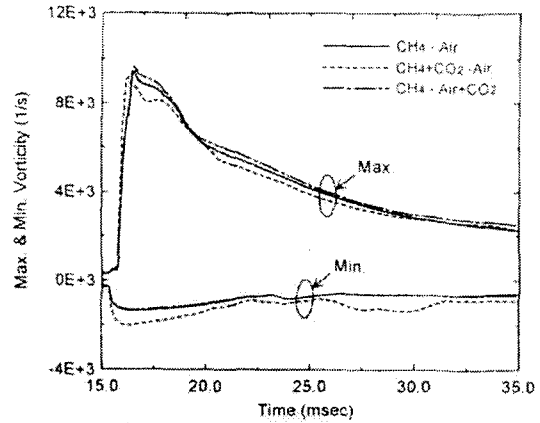


Fig. 7 Maximum and minimum vorticity with time

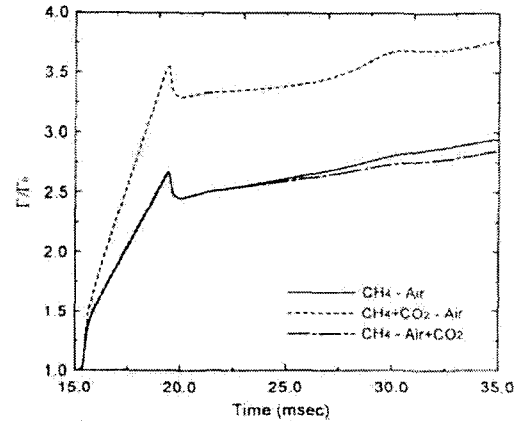


Fig. 8 Evolution of the total circulation with time

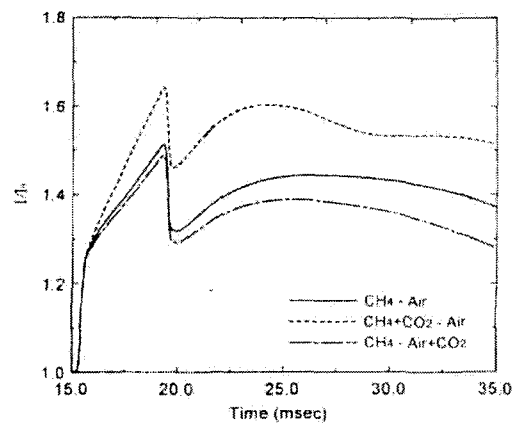


Fig. 9 Evolution of the hydrodynamic impulse with time

될 수 있다. 즉 와도의 크기는 다른 조건에 비해 작은 값을 가지지만, 고온유체의 유입량 증가로 인하여 와동의 반경이 증가하여 상대적으로 큰 와도를 갖는 면적이 많아지기 때문이다. 그러나 CH<sub>4</sub>-Air와 CH<sub>4</sub>-Air+CO<sub>2</sub>의 경우에는 전체적으로 큰 차이를 보이지 않으며, 20ms 이후에서 미소한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

전체순환은 전 영역내의 총괄적인 와도의 강도

만을 의미하기 때문에, CO<sub>2</sub> 첨가로 인한 주위 유체의 유입 및 혼합과 관련된 영향을 검토하기 위하여 Fig. 9는 수력 임펄스(Hydrodynamic impulse)를 시간에 대해 도시한 것이다. 이에 대한 정의는 식 (11)과 같으나, 2차원 축대칭 원통좌표의 경우에는 축방향 성분만이 유효한 값을 가지므로 식 (12)와 같이 유도된다.

$$I = \frac{1}{2} \iiint \rho \bar{r} \times \bar{\omega} dV \quad (11)$$

$$I_r = \pi \iint \rho \omega_\theta r^2 dA \quad (12)$$

운동량의 차이로 인한 와동 내부로 주위 유체의 유입 및 혼합정도를 Fig. 5를 통해 가시적으로 살펴보았듯이, 연료에 CO<sub>2</sub>를 첨가한 경우에 CH<sub>4</sub>-Air의 경우보다 약 20% 더 큰 수력 임펄스를 가지는 것을 볼 수 있으며, 와동 내부의 혼합도가 가장 낮았던 CH<sub>4</sub>-Air+CO<sub>2</sub>의 경우에는 다른 조건에 비해 수력 임펄스가 가장 작게 예측됨을 확인할 수 있다. 즉, 수력 임펄스의 계산을 통해 CO<sub>2</sub>를 포함한 와동의 경우에는, 말림에 의한 주위 유체의 유입량이 상대적으로 많아지며, 결국 와동 내부의 혼합정도를 증진시킴을 알 수 있다.

### 3.2 CO<sub>2</sub> 첨가에 의한 와동 변화특성

CH<sub>4</sub>-Air 제트 확산화염에서 CO<sub>2</sub>를 포함한 단일 와동의 동적특성을 보다 상세히 검토하기 위하여 Fig. 10에 와도의 생성, 전개 및 소멸에 영향을 미치는 인자들의 전체순환 변화율을 시간에 따라 나타낸 것이다. 이와 관련된 와도 전달 방정식은 다음 식 (13)와 같이 표현된다.<sup>(17)</sup>

$$\frac{D\omega_\theta}{Dt} = (\omega_\theta \cdot \nabla)u - \omega_\theta(\nabla \cdot u) + \frac{1}{\rho^2}(\nabla\rho \times \nabla p) + \nabla \times \left( \frac{\rho - \rho_s}{\rho} \right) g + (\text{Viscous Related Terms}) \quad (13)$$

여기서 우변의 첫번째 항은 3차원 현상에서 중요시되는 Stretching 항으로서 본 계산에서는 2차원 축대칭으로 제한되어  $\theta$ 방향의 Stretching의 영향만을 고려하였다. 두번째 항은 반응열에 의한 부피팽창(Volumetric expansion)항으로 일반적으로 와동의 소산에 주요 영향을 준다. 세번째 항은 Baroclinic torque항으로 비반응 유동장에 비해 화염에 의해 급격한 밀도변동을 수반하는 연소장에서 와도를 생성시키는데 크게 기여하는 것으로 알려져 있다. 이는 중력 및 와동 회전에 의한 압력구배

$\nabla p$ 와 연료 및 주위류의 혼합과 화염면의 온도분포에 따른 밀도구배  $\nabla\rho$ 의 비정렬로부터 발생된다. 네번째 항은 중력항으로 반경방향의 밀도구배와 중력 가속도와 상호작용에 의해 발생되며, 일반적으로 화염면을 중심으로 반경방향의 밀도구배의 부호에 따라 안쪽영역에서는 와도를 감소시키고, 바깥쪽 영역에서는 와도를 생성시키는데 기여한다. 마지막으로 점성 관련항은 크게 점성에 의한 와도 확산항과 밀도구배와 전단응력 변화와 관련된 항으로 구분된다. 본 계산에서는 식 (13)의 좌변과 우변의 나머지 항들과의 차이를 점성 관련항으로 고려하였다. 또한 좌변의 물질도함수는 와도의 시간변화율과 대류항으로 구성되어 있는데, 와도의 시간변화율에 대한 면적 적분값은 식 (14)와 같이 전체순환의 변화율을 의미한다. 그러므로 식 (13)에서 우변의 각 항에 대한 면적 적분값을 통해 Fig. 10에서와 같이 전체순환 변화율에 미치는 각 항의 기여도를 예측할 수 있다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \iint \frac{\partial \omega_\theta}{\partial t} dA \quad (14)$$

Fig. 10(a)는 전체순환의 변화율에 대한 Stretching 항의 기여도를 도시한 것이다. 앞에서 언급했듯이 2차원 축대칭 계산에서  $\theta$ 방향의 영향만이 고려된 Stretching 항은  $\omega_\theta v/r$ 로 표현된다. 와동의 생성초기에 고속유동에 의해 와동 선단에서 양의 크기를 갖는 반경방향의 속도  $v$ 가 지배적이므로 와동을 생성시키는데 기여한다. 그러나 약 20ms에서는 고속유동의 단절로 인하여 외부공기가 유입되면서 와동 내부의 말림에 의한 음의 크기를 갖는  $v$ 가 증가하여 순간적으로 와동의 소산에 기여함을 알 수 있다. 또한 와동의 생성초기에 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>-Air의 경우는 다른 조건에 비해 Stretching 항이 생성에 미치는 영향이 작으며, 와동이 하류로 전개될수록 변화가 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 10(b)는 부피팽창에 의한 영향을 나타낸 것으로, 초기에 와동의 소산에 크게 기여함을 알 수 있다. CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>-Air의 경우에 그 영향이 더욱 크게 나타나는데, 이는 동일한 유속에 의해 와동이 생성되었고 CO<sub>2</sub>에 의해 화염온도는 더욱 낮아지지만, 초기 큰 운동량으로 인하여 와동 내부로 고온 유체의 유입량이 증가하게 되어 팽창효과가 더욱 크게 작용되기 때문이다. 그러나 화염의 상호작용이 커지는 하류에서는 이미 와동 내부의 온도가 상승되어 화염에 의한 와동 소산의 효과는 다른 조건에 비해 작음을 확인할 수 있다.



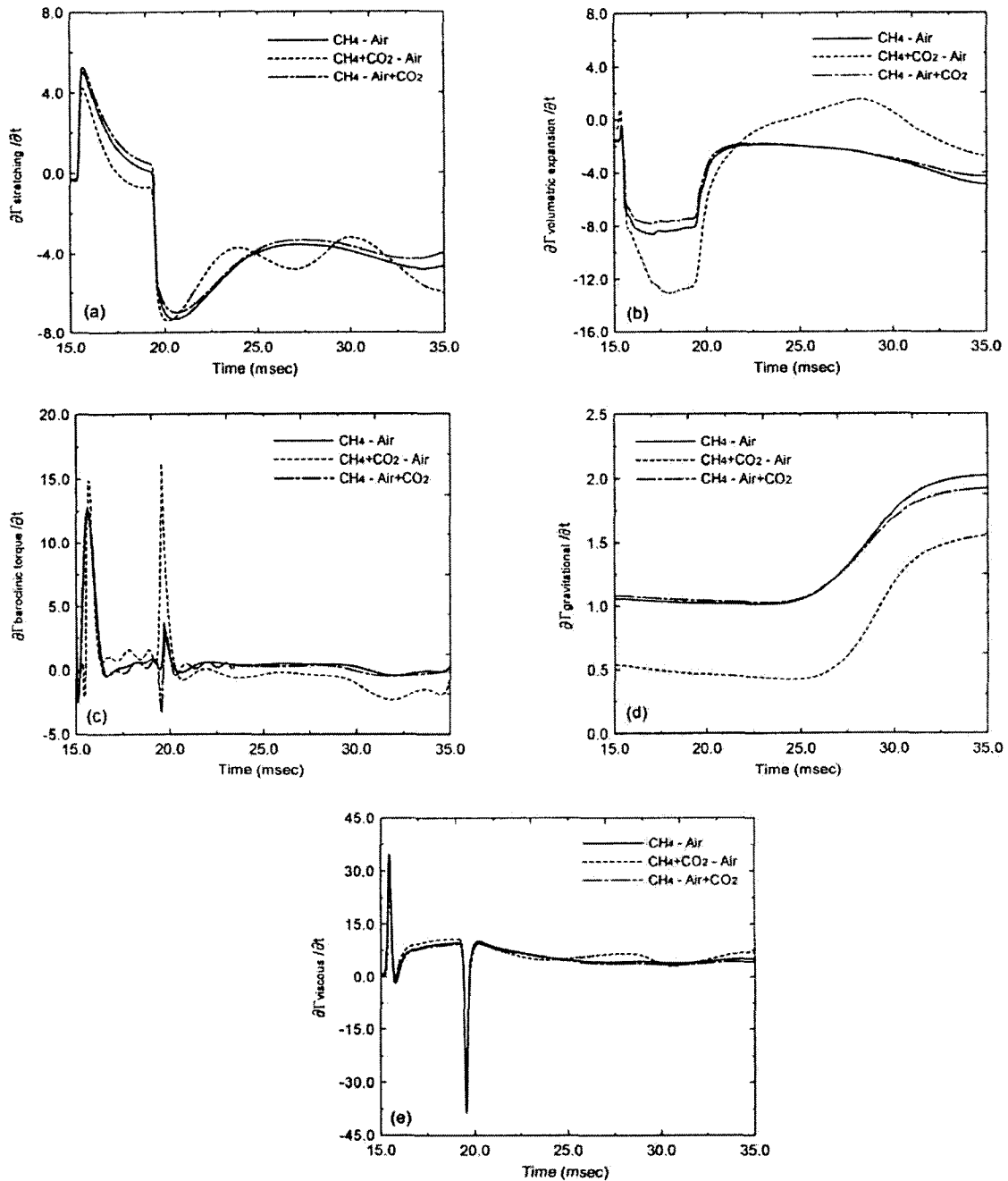


Fig. 10 Contribution to the rate of the total Circulation with time from each term in Eq. (14) for all cases ; (a) stretching, (b) volumetric expansion, (c) baroclinic torque, (d) gravitational, (e) viscous re-led terms

Fig. 10(c)는 Baroclinic torque에 의한 영향을 도시한 것으로, 모든 조건이 초기에는 와동의 생성에 기여하며, 점성항을 제외한 다른 항들에 비해 영향을 주는 정도가 매우 큼을 알 수 있다. 또한, 초기에 CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>-Air의 경우에는 다른 조건에 비해 생성에 미치는 영향이 더 크며, 약 20ms에서도 와동 생성에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다. 이는 각 조건에서 단일 와동에 의한 전체적인 압력

분포는 유사하나, 연료에 CO<sub>2</sub>가 첨가된 경우에 와동에 의한 밀도장의 큰 변화로 인하여 생성쪽에 크게 기여됨으로 추정된다. 그러나 20ms 이후에 화염과의 상호작용에 의해 다른 조건과 비교해 볼 때 오히려 와동 소산에 미치는 영향이 큼을 볼 수 있다.

Fig. 10(d)는 부력항에 의한 기여도를 도시한 것으로 각 조건의 시간에 대한 경향은 와동이 하류로 전개되면서 화염과 상호작용이 두드러지는 약

25ms에서 부력의 영향이 증대되는 것을 볼 수 있다. 부력의 영향은 반경방향의 밀도변화에 의해 발생되기 때문에  $\text{CH}_4+\text{CO}_2\text{-Air}$ 의 경우에 연료류와 주위류의 밀도차가 작아지기 때문에 다른 조건에 비해 부력의 영향이 작음을 알 수 있다. 또한  $\text{CH}_4\text{-Air}$ 의 경우는  $\text{CH}_4\text{-Air}+\text{CO}_2$  보다 동일 온도에서 연료 및 주위류의 밀도차이는 더 작지만, 화염 온도가 높기 때문에 시간이 진행될수록 부력에 의해 와동의 생성에 미치는 영향은 미소하게 더 커짐을 알 수 있다.

Fig. 10(e)는 전체순환의 변화율에 대한 점성 관련항의 기여도를 도시한 것이다. 전체순환의 변화율에 미치는 영향은 다른 항들과 비교할 때 가장 크게 나타나는데, 이는 본 계산에서 단일 와동의 생성을 위한 초기의 큰 유속에 의한 영향으로 사료된다.  $\text{CO}_2$  첨가는 동점도( $\mu/\rho$ )를 감소시켜 레이놀즈 수의 증가를 초래하여 결과적으로 유동장을 더욱 불안정하게 할 것으로 예상되어진다. 그러나  $\text{CH}_4+\text{CO}_2\text{-Air}$ 의 경우에 다른 조건과 비교하여 전체순환 변화율의 증가에 영향을 주지만, 큰 차이를 보이지 않는다. 즉  $\text{CO}_2$  첨가에 의한 동점도의 변화가 와동의 생성과 소산에 미치는 영향은 상대적으로 미소함을 확인할 수 있다.

본 연구로부터 산화제에  $\text{CO}_2$  첨가 여부는 와동의 동적거동에 비교적 큰 변화를 주지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 단일 와동이 연료측에서 생성되었기 때문으로 판단된다. 추후 연료 및 산화제에  $\text{CO}_2$  첨가에 의한 와동의 특성변화를 보다 명확하게 규명하기 위해서는  $\text{CO}_2$ 의 첨가량과 와동의 강도 및 와동의 생성위치에 따른 변화 등의 다양한 조건에 대해 검토가 요구된다.

#### 4. 결론

$\text{CH}_4\text{-Air}$  확산화염을 대상으로 연료 및 공기측에  $\text{CO}_2$ 가 첨가된 경우, 강제로 분출된 연료 제트에 의해 생성된 단일 와동의 동적거동에 관한 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 와동의 강도와 운동량의 세기를 비교 검토하기 위해 전체순환과 수력 임펄스를 도입하였으며, 이를 통하여 와동의 거동을 좀 더 잘 이해할 수 있었다.

연료에  $\text{CO}_2$ 가 포함된 경우( $\text{CH}_4+\text{CO}_2\text{-Air}$ ), 공기에  $\text{CO}_2$ 가 포함된 경우( $\text{CH}_4\text{-Air}+\text{CO}_2$ ) 및  $\text{CO}_2$ 가 포함되지 않은 경우( $\text{CH}_4\text{-Air}$ )에 동일한 연료류 유속에 의해 생성된 와동은 연료류 혼합기의 밀도차에 의한 초기 유입 운동량의 차이로 인해 화염형상과

주위 유체와의 혼합정도에 서로 다른 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다. 즉, 연료에  $\text{CO}_2$ 가 포함된 경우의 와동은 증가된 연료류의 밀도로 인해 유입 운동량을 증가시켜 와동 내부로의 화염대 고온 유체의 유입량을 증가시킨다. 또한, 이로 인해 단일 와동 내부의 혼합은 촉진되며, 열적 팽창으로 반경은 상대적으로 증가하게 되고, 다른 조건에 비해 화염면을 더 크게 변형시키는 것을 알 수 있었다. 따라서, 연료류에  $\text{CO}_2$ 를 첨가한 경우의 와동이 화염과 가장 강한 상호작용을 하게 됨을 알 수 있었다. 또한 주위류에  $\text{CO}_2$ 를 포함한 경우는  $\text{CH}_4\text{-Air}$ 의 경우와 와동의 거동을 비교할 때, 전체적으로 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

와도 전달방정식을 이용한 와동의 생성 및 소멸에 미치는 주요 인자들을 검토할 수 있었다. 연료에  $\text{CO}_2$ 를 포함한 경우의 와동은 다른 조건에 비해 부피팽창이 와동의 소산에 미치는 영향이 가장 지배적이었으며, 와동의 생성에는 Baroclinic torque에 의한 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 그 외의 Stretching, 점성, 부력 효과들은 와동 생성에 미치는 영향이 비교적 작음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(Combustion engineering research center)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Charles E. B., 1998, Oxygen-Enhanced Combustion, CRC Press.
- (2) Lee C. E., Hwang C. H. and Kim S. H., 2002, "Characteristics of Flame Stabilization of the LFG Mixing Gas," *Transactions of KSME B*, Vol. 26, No. 2, pp. 328~335.
- (3) Bae J. R. and Lee B. J., 2002, "Effect of Diluents and Oxygen-enrichness on the Stability of Nonpremixed Flame," *Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting B*, pp. 2019~2024.
- (4) Saito N., Ogawa Y., Saso Y., Liao C. and Sakei R., 1996, "Flame-extinguishing Concentrations and Peak Concentrations of  $\text{N}_2$ , Ar,  $\text{CO}_2$  and Their Mixtures for Hydrocarbon Fuels," *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 185~200.
- (5) Lee C. E., Lee S. R., Han J. W. and Park J., 2000, "Numerical Study on Effect of  $\text{CO}_2$  in Flame Structure and  $\text{NO}_x$  Formation of  $\text{CH}_4\text{-air}$  Counterflow Diffusion Flame," *Int. J. Energy Research*, Vol. 24, pp. 2~12.
- (6) Han J. W. and Lee C. E., 2002, "Numerical Study on

- Flame Structure and NO Formation Characteristics in Oxidizer-controlled Diffusion Flames," *Transactions of KSME B*, Vol. 26, No. 5, pp. 742~749.
- (7) Liu H., Guo H., Smallwood G. J. and Gulder O. L., 2001, "The Chemical Effects of Carbon Dioxide as an Additive in an Ethylene Diffusion Flame: Implications for soot and NO<sub>x</sub> Formation," *Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 778~787.
- (8) James S. and Madnia C. K., 1996, "Direct Numerical Simulation of a Laminar Vortex Ring," *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 9, pp. 2400~2414.
- (9) Hewett J. S. and Madnia C. K., 1998, "Flame-Vortex Interaction in a Reacting Vortex Ring," *Phys. Fluids*, Vol. 10, No. 1, pp. 189~205.
- (10) McMurtry P. A., Jou W. H., Riley J. J. and Metcalfe R. W., 1985, "Direct Numerical Simulations of a Reacting Mixing Layer with Chemical Heat Release," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 962~970.
- (11) Kee R. J., Rupley F. M. and Miller J. A., 1989, "Chemkin-II: A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *Sandia Report*, SAND89-8009B.
- (12) Kee R. J., Lewis G. D. Warnatz J., Coltrin E. and Miller J. A., 1986, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *Sandia Report*, SAND86-8246.
- (13) Najm, H. N. and Wyckoff P. S., 1997, "Premixed Flame Response to Unsteady Strain Rate and Curvature," *Combustion and Flame*, Vol. 110, pp. 92~112.
- (14) Hirt, C. W. and Cook, J. L., 1972, "Calculating Three-Dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain," *Journal of Computational Physics*, Vol. 10, pp. 324~340.
- (15) Oh C. B. and Lee C. E., 2001, "Numerical Simulation of Unsteady CH<sub>4</sub>/Air Jet Diffusion Flame," *Transactions of KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1087~1096.
- (16) Dupont V. Pourkashanian M. and Williams A., 1993, "Modeling of Process Heaters Fired by Natural Gas," *Institute of Energy*, Vol. 66, pp. 20~28.
- (17) Jiang X. and Luo K. H., 2000, "Spatial Direct Numerical Simulation of the Large Vortical Structures in Forced Plumes," *Flow Turbulence and Combustion*, Vol. 64, pp. 43~69.