

반응과 비반응 제트유동에서 단일 와동의 동적 거동에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Investigation on the Dynamic Behaviors of Single Vortex in a Reacting and Non-reacting Jet Flow

*황철홍*¹⁾, 오창보¹⁾, 이대엽²⁾, 이창언²⁾

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

Abstract

The dynamic behaviors of the single vortex in a reacting and non-reacting methane-air jet flow 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. After fuel and air were developed entirely in computational domain, the single vortex was generated by an axisymmetric jet that was impulsed to emit a cold fuel. Through comparisons of single vortex in reacting and non-reacting jet flow, it was found that global dynamic behaviors and the mechanisms leading to the formation, transport processes of vortex ring were influenced significantly by heat release from reaction. In addition, the interaction between a single vortex and flame bulge generated by buoyance effect in a reacting jet flow was found.

1. 서론

화석연료의 연소에서 CO₂를 감축하기 위한 방안은 연소 시스템의 효율을 향상시켜 연료 사용량을 감축하는 것으로, 산화제 제어 연소법이 그 해결방안으로 관심의 대상이 되고 있다[1]. 이러한 연소법을 실용연소기에 적용하기 위해서는 난류화염의 연소특성 파악이 선행되어야 한다. 이를 위해 여러 형태의 난류 화염에서 흔히 관찰되는 거대 와구조(Large vortical structure)와 화염과의 상호작용에 관한 이해가 중요시되며, 이들에 관한 많은 연구들은 단순하고 제어가 용이한 와동의 기본 구조인 단일 와동에 대해 수행되어져 왔다.

와동과 화염간의 상호작용에 관한 연구는 크게 화염특성에 관한 연구와 와동의 동적특성에 관한 연구로 나눌 수 있는데, 와동에 의한 화염의 특성에 관해서는 초기에 연료와 산화제가 분리된 경계면에서 확산화염을 형성하고 이 화염

면에 와동을 생성시켜 혼합층에서 화염면의 변형 및 와동의 말림에 따라 형성되는 반응대의 성장에 대해 주로 연구되어 졌다[2,3]. 근래의 연구로는 2차원 층류 대향류 화염을 대상으로 단일 와동과의 상호작용을 검토하여 비정상 화염거동에 대해 보다 상세한 연구가 이루어지고 있다[4]. 화염과 상호작용하는 와동에 관한 연구들을 살펴보면, James 등[5]은 출구의 형상 및 유속조건에 따라 와동의 생성특성에 대해 연구를 수행하였으며, Hewett 등[6]은 주위류의 온도변화에 의해 생성된 화염과 상호작용하는 와동의 생성, 전개 및 소멸에 관하여 검토하였다. 확산화염과 와동간의 상호작용에 관한 최근의 연구들은 대부분 예혼합화염과 유사하게 전개되는 와동 외부에 화염면을 형성시키거나, 이미 형성된 화염면이 와동에 의해 전개되는 동안의 거동을 연구하고 있다. 그러나 실제 난류 화염에서 쉽게 볼 수 있듯이, 와동이 이미 형성된 확산화염 내부를 통과하면서 상호작용을 통한 동적 거동을 검토하는 것도 복잡한 난류 화염의 구조를 이해하는데 많은 정보를 제공할 것으로 기대된다.

본 연구는 앞에서 언급한 산화제 제어 연소조건에서 연료 및 산화제 조성 변화에 따른 와동의 특성과 화염-와동간의 상호작용에 관한 연구

1) 인하대학교 대학원 기계공학과

2) 인하대학교 기계공학과 (402-751, 인천시

남구 용현동 253, Tel : 032-860-7323)

의 일환으로, 본 논문에서는 순수 CH₄-공기 확산화염과 비반응에 관한 결과의 비교를 통하여 이들 내부를 통과하는 단일 와동의 동적거동에 대해 검토하고자 한다.

2. 지배방정식 및 계산방법

2.1 지배방정식 및 수치해법

본 연구의 계산대상은 Fig. 1에서와 같이 2차원 축대칭 제트 유동 및 확산화염이다. 유동조건은 음향유속에 비해 매우 작은 유속을 가지므로 낮은 마하수 근사법(Low mach number approximation)[3]을 적용하면 지배방정식은 식 (1)~(5)와 같이 연속, 운동량, 화학종, 에너지 및 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

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

여기서, p_0 와 p_1 은 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[7] 및 TRANSFIT Package[8]를 이용하였다.

수치해법으로 지배방정식은 엇갈림 격자계를 이용하여 차분하였으며, 대류항에 대해서 QUICK

Table 1. Inflow boundary conditions

	Comp. (Mole fraction)	Vel. (m/s)	Temp. (K)
Nozzle Fluid	X _{CH₄} =1.0	0.6	298
Ambient Fluid	X _{O₂} =0.21 X _{N₂} =0.79	0.2	298

법, 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-교정자법(Predictor-corrector method)을 일부 수정하여 시간 적분을 수행하였으며, 속도와 압력의 교정은 밀도변동을 고려하도록 HSMAC법(Highly Simplified Marker And Cell)을 수정하여 사용하였다[9].

2.2 계산대상 및 조건

수치계산은 Fig. 1에서와 같이 직경 10mm, 립 두께 0.46mm의 노즐에서 생성되는 CH₄-공기 확산화염 및 유동을 대상으로 하였으며, 노즐 출구의 중심을 원점으로 하여, x=-5~80mm, r=0~70mm의 영역에서 수행되었다. 계산 격자에 대해서는 축방향과 반경방향에 최소 격자간격 Δx= 0.2mm, Δr=0.15mm를 가지는 240×160개의 비균일 격자계를 사용하였다. 격자수의 결정은 비반응 유동장에서 300×200개 격자계의 결과와 비교하여 전체 순환(Total circulation) 및 단면 유속의 오차가 1% 미만이라는 검증을 통해 이루어졌으며, 이 경우에 반응장에 대해서 화염대의 열 발생율이 공간적으로 충분한 정확도를 가지고 있음을 확인하였다.

연료 및 공기 노즐 출구의 경계조건은 Table 1에서와 같이 연료류 및 공기류 모두 노즐 벽면 근처를 제외하고 균일한 유속을 갖도록 하였으며, 그 이외의 경계조건은 Fig. 1에 제시하였다.

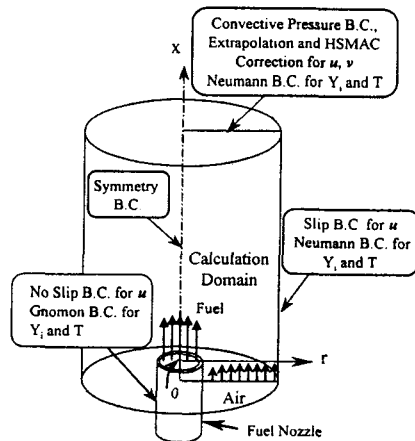


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions.

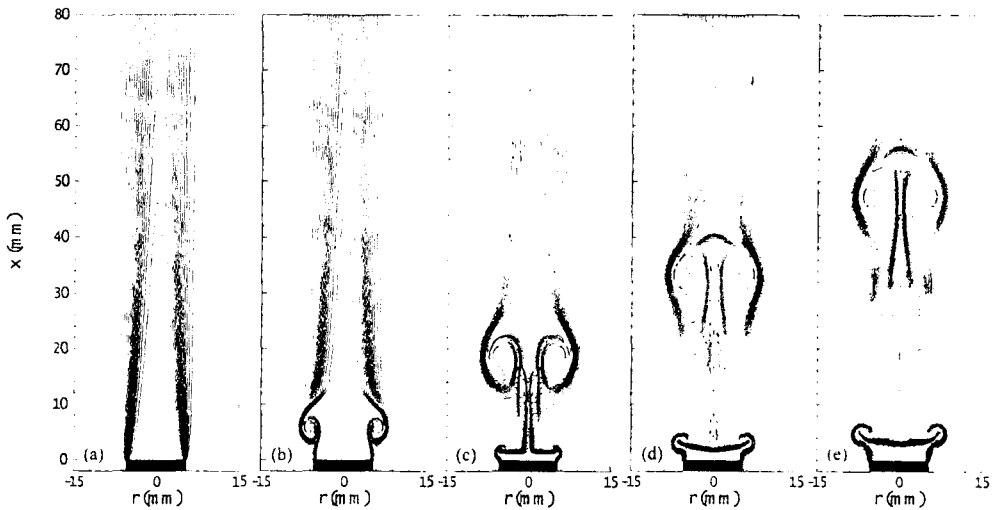


Fig. 3 Temporal evolution of mixture fraction in a non-reacting flow ; (a) 0.00 ms, (b) 18.75 ms, (c) 23.75 ms, (d) 28.75 ms, (e) 33.75 ms

CH₄-공기의 화학반응을 계산하기 위해서 Dupont 등[10]이 제시한 2단계 총괄반응식을 이용하였으며, 반응에 참여하는 화학종은 CH₄, CO, CO₂, H₂O 및 O₂이며 N₂는 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 전개되었을 때, 단일 와동을 생성시키기 위해서 연료노즐에 시간에 대해서는 Fig. 2와 같은 속도조건, 공간에 대해서는 Top-hat 형태의 속도조건을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3과 4는 비반응과 반응 유동장 내에서 단일 와동의 전개특성을 살펴보기 위해 시간에 따른 혼합분율(Mixture fraction)을 도시한 것으로 이의 정의는 다음과 같다.

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

여기서, 하첨자 1과 2는 각각 연료류와 공기류를 의미한다.

Fig. 3의 결과에서 18.75ms는 계속적으로 고속의 유량이 분사되는 시기이므로 강하게 와동이 생성되고 있다. 고속의 유량이 단절되고 초기 유속과 같은 0.6m/s가 유입되고 있는 23.75ms의 경우는 이전에 생성된 와동이 하류로 진행되면

서 주위 유체의 유입으로 인하여 와동의 반경이 증가되고 있음을 알 수 있다. 또한 순간적인 고속 유동이 단절된 후에 관성효과에 의해 노즐 근처에서 작은 와도를 갖는 와동이 생성되고 있다. 계속적으로 시간이 진행되면서 단일 와동의 중심부에 주위 유체와의 혼합이 더욱 증진되고 있으며, 노즐 근처의 와동 역시 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 4에서는 Fig.3의 비반응 결과와 비교하여 살펴보면, 18.75ms에서 비반응에 비해 와동의 전개속도가 크며, 화염대의 반응에 의해 생성된 고온 유체의 유입으로 인하여 외부로 팽창되며, 와동의 바깥 부분이 하류로 약간 부상되었음을 볼 수 있다. 23.75ms에서도 비반응에 비해 와동의 반경이 훨씬 증가하며, 말림의 정도를 통해 최대 와도(Vorticity)가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 그리고 노즐 근처에서 새로운 와동 생성이 없음을 볼 수 있는데, 이는 노즐 림 근처에서 화염에 의한 높은 점성효과에 의해 작은 와도를 갖는 와동이 생성되지 못하기 때문이다. 23.75ms 이후에는 와동의 후미에서 비반응에 비해 혼합이 상대적으로 증진됨을 확인할 수 있으며, 화염의 부력효과에 의해 생성되는 Bulge의 거동에 의해 와동 선단의 혼합층이 좁게 나타난다. 이를 통해 열생성이 와동에 미치는 영향 이외에 화염 주위의 외부 Bulge에 의한 유동장의 압력과 속도 등의 변경으로 와동의 전개특성에 큰 영향을 줄 것으로 예측되어진다.

Fig. 5는 와도에 의한 전체 유동장의 변화를 예측하기 위하여 와도의 강도를 의미하는 전체

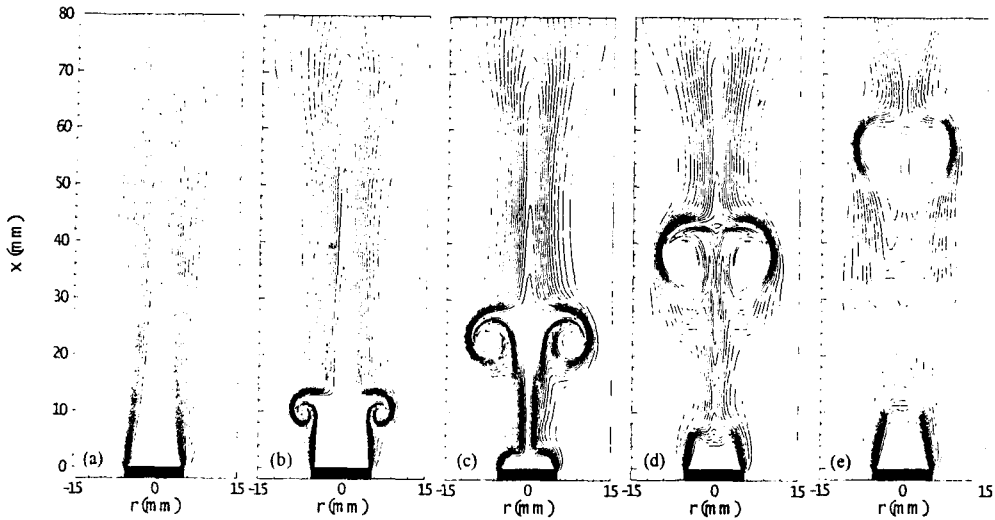


Fig. 4 Temporal evolution of mixture fraction in a non-reacting flow ; (a) 0.00 ms, (b) 18.75 ms, (c) 23.75 ms, (d) 28.75 ms, (e) 33.75 ms

순환(Total circulation)을 시간에 대해 도시한 것으로, 이의 정의는 식(7)과 같으며 전 계산영역에 대한 와동의 적분값을 의미한다.

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

와동의 생성 이전의 유동장이 이미 다른 순환을 갖고 있기 때문에 초기상태에 대한 각각의 변화량을 관찰하기 위하여 각 조건의 초기 순환으로 무차원 하였다. 모든 조건에서 초기에 순환이 급격히 증가하며 고속유동이 단절되는 약 20ms 근처에서 다시 감소하는 형상을 보이고 있다. 이 기간에서 비반응의 경우가 반응에 비해 다소 높게 나타나며 유동장에서 더 높은 와도를 형성시킴을 알 수 있다. 20ms 이후에는 균일한 값을 가지는 반면, 반응의 경우에는 시간에 대해 화염장에서 와도의 강도가 점차 증가됨을 볼 수 있다. 이는 화염과의 상호작용에 의한 결과로써, 최대 와도의 크기는 비반응에 비해 작더라도 시간 전개에 따라 와동의 반경이 증가하기 때문에 전체 화염장의 순환이 비반응 유동장에 비해 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6과 7은 Fig. 3에서 관측된 비반응과 반응 유동장 내부를 통과하는 단일 와동의 동적 거동을 살펴보기 위해 나타낸 것으로, 시간에 따른 와동 중심의 축방향 위치 및 와동의 반경을 도시한 것이다. 이 값들은 단일 와동의 중심을 의미하는 와도의 크기가 최대인 위치를 기준으로 결정되었으며, 노즐 림에서 생성된 와동의 영향을 배제하기 위해 단일 와동이 노즐 출구로부

터 2.5mm 이상에 위치하는 순간부터 계산하였다. Fig. 6에서 각 시간에 따른 위치변화를 선형적인 기울기로 나타낸 결과, 비반응의 경우 초기에는 약 2.2m/s의 와동 진행속도를 갖는 반면, 이후에는 균일하게 2.9m/s를 갖는다. 반응의 경우에 초기에는 2.8m/s의 균일한 속도를 갖지만, 하류에서는 4.2m/s로 진행함을 알 수 있다. 즉 비반응의 경우, 노즐 초기에서 와동의 생성속도가 느리며, 반응의 경우 하류로 갈수록 와동 내부의 고온으로 인한 부력의 영향으로 속도가 증가됨으로 예측된다.

Fig. 7에서 반응의 경우에 와동의 반경은 비반응에 비해 초기에는 유사한 크기를 가지나, 18ms 이후에는 차이가 나기 시작하여 25ms까지 계속적으로 증가되다가, 이후 전체적으로 감소하며 부분적으로는 미소 증가를 반복하여 결국

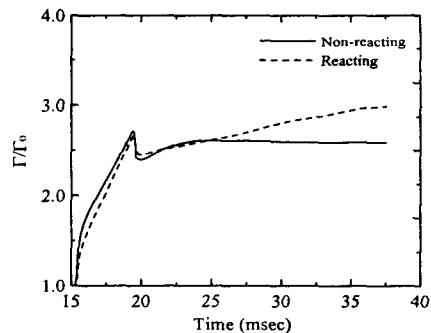


Fig. 5 Evolution of the circulation versus time for non-reacting and reacting

비반응 의 경우와 유사한 크기를 갖게 된다. 즉 앞에서 언급했듯이, 와동 내부로 화염대의 고온 생성물의 유입하게 되어 반경이 증가하다가 하류로 갈수록 와도의 감소 및 외부 Bulge와의 상호작용으로 인하여 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 비반응 및 반응장 내에서 진행되는 단일 와동의 거동을 보다 자세히 검토하기 위하여 와동의 생성, 전개 및 소멸에 영향을 미치는 인자들에 대한 순환 변화율을 시간에 따라 나타낸 것이다. 우선 와동을 지배하는 방정식은 다음 식(8)과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$\frac{D\omega_{\theta}}{Dt} = (\omega_{\theta} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \omega_{\theta} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{\rho^2} (\nabla \rho \times \nabla p) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \omega_{\theta} + \nabla \times \left(\frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right) \mathbf{g} \quad (8)$$

여기서 우변의 첫째항은 Stretching 항이고 둘째항은 Thermal expansion을 의미하며, 셋째항은 Baroclinic torque, 넷째항은 Viscous, 마지막 항은 Gravitational 항을 나타낸다. 이때 좌변의 물질도함수는 와도의 편미분항과 대류항으로 구성되어 있는데, 와도의 편미분항의 면적 적분값은 식(9)와 같이 순환의 변화율을 의미한다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \int \int \frac{\partial \omega_{\theta}}{\partial t} dA \quad (9)$$

위와 같은 방법으로 식(8)의 각 항의 면적 적분된 값을 통해 전체 순환 변화율에 미치는 각 항의 기여도를 예측할 수 있게 된다.

Fig. 8(a)는 Stretching 항으로 비반응의 경우에 초기에는 고속 유량이 분사되는 과정에서 급격히 증가되어 와동의 생성에 기여하며, 20ms에서 다시 0으로 감소하며 이후 와동의 소멸에 기여함을 알 수 있으며, 25ms 이후에는 와동에 거

의 영향을 주지 않고 있다. 반응의 경우에는 비반응에 비해 위에서 언급된 기여도가 작으며, 20ms 이후에는 와동 소멸에 기여함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 Thermal expansion 항으로 비반응에서는 와동 생성 초기에 미소한 영향을 주나, 반응에서는 초기에 와동의 소멸에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(c)에서는 반응장에서 가장 기여도가 크다고 알려져 있는 Baroclinic torque 항에 관한 순환 변화율을 나타낸 것이다. 반응의 경우, 초기에 급격히 증가되며 와동의 생성 이후, 거의 기여하지 않음을 알 수 있다. 비반응의 경우에 초기에는 역시 생성에 크게 영향을 미치나, 고속 유량이 단절되는 시기에 와동 소멸에 생성과 같은 크기의 변화를 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(d)의 경우에 Viscous에 의한 순환 변화율은 비반응과 반응이 비슷한 거동을 보이며, 반응의 경우 순환의 변화에 미치는 영향이 작음을 알 수 있으며, 약 20ms를 제외하고는 전체적으로 소멸에 기여됨을 예측할 수 있다. 마지막으로 Fig. 8(e)는 중력에 의한 영향을 나타낸 것으로 반응의 경우에는 25ms 이후에서 와동의 생성에 미치는 영향이 점차 증가하며, 비반응의 경우에는 오히려 미소하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 위에서 언급된 와동의 전개과정에서 생성, 소멸에 영향을 주는 인자 중에서 기존 문헌들에서 언급되었던 것처럼 초기 와동의 생성에는 Baroclinic torque의 영향이 지배적이며, 반응의 경우, Thermal expansion이 소멸에 미치는 영향이 지배적임을 확인할 수 있었다. 또한 일반적으로 2차원 유동에서 관측되지 않는 Stretching에 의한 영향은 순간적인 고속유량에 의해 생성되는 와동의 경우에는 초기 와동 생성에 기여함을 알 수 있었다.

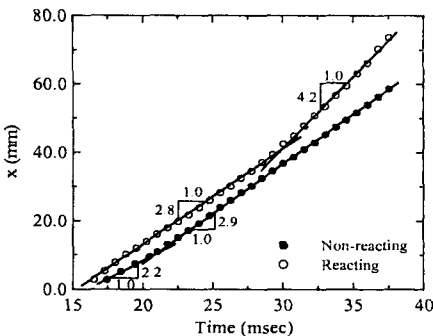


Fig. 6 Axial position of the single vortex versus time.

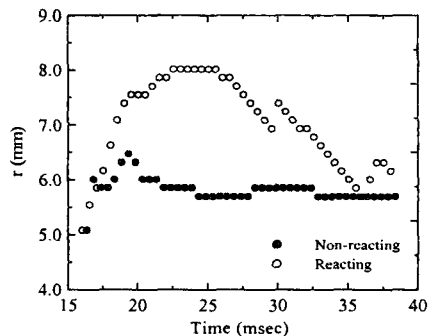


Fig. 7 Radius of the single vortex versus time.

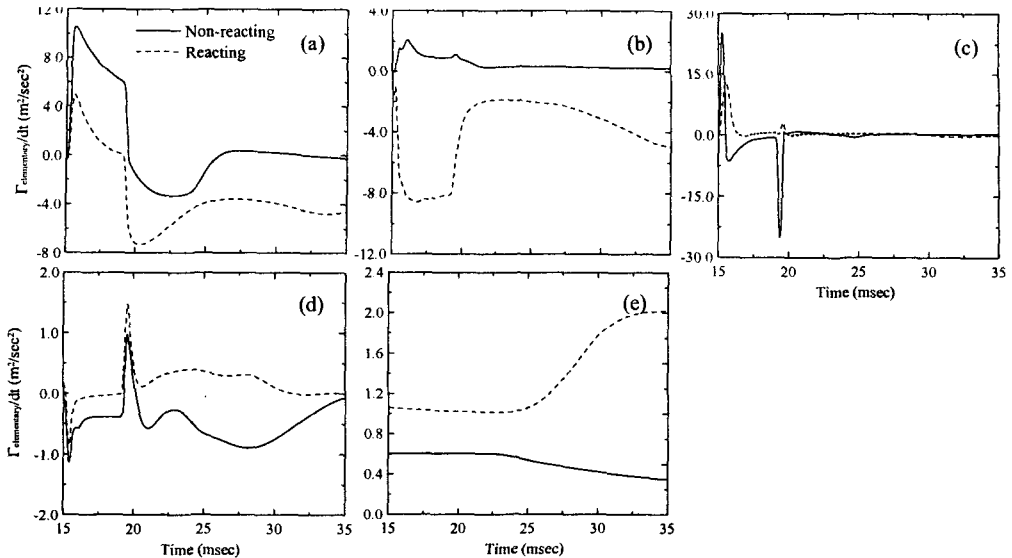


Fig. 8 Contribution to rate of change of the circulation versus time from each term in Eq.(8) ; (a) stretching, (b) thermal expansion, (c) baroclinic torque, (d) viscous, (e) gravitational term.

4. 결론

순수 CH₄-공기 확산화염과 비반응 유동장 내부를 통과하는 단일 와동의 동적 거동에 관한 수치계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

반응의 경우에 비반응에 비해 최대 와도가 작으며, 화염대의 고온 생성물의 유입에 의한 팽창으로 인하여 와동의 진행속도가 하류에서 더욱 커진다. 와동의 반경 역시 초기에 증가하다가 하류로 갈수록 부력에 의해 생성되어지는 화염 Bulge와의 상호작용 및 와도의 감소로 인하여 비반응의 경우와 유사한 크기를 갖게 된다.

와동의 전체적인 변화에 영향을 주는 인자 중에서 반응의 경우에 Baroclinic torque는 초기에 주로 생성에만 기여하나, 비반응에서는 생성과 소멸에 모두 기여함을 알 수 있다. 또한 Thermal expansion은 와동이 생성되는 전 기간에 걸쳐 소멸에 영향을 미치며, Stretching에 의한 영향은 비반응과 반응의 경우에 초기 와동 생성에 주로 기여함을 알 수 있다.

후기

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

립니다.

참고문헌

- [1] 한지웅, 이창언, 대한기계학회논문집 B권, 제 26권 제5호, (2002), p.742-749.
- [2] Marble, F.E, Recent Advances in the Aero- space Science, p.395.
- [3] McMurtry P.A. et al., AIAA Journal. 24-6, (1985), p.962-970.
- [4] Katta V.R, et al., Proc. of the Combustion Institute, 28, (2000), p.2055- 2062.
- [5] James S. et al., Phys. Fluids, 8-9, (1996), p.2400-2414.
- [6] Hewett J. S. et al., Phys. Fluids, 10-1, (1998), p.189-205.
- [7] Kee, R.J. et al., Chemkin-II, SAND89-8009B.
- [8] Kee, R.J. et al., Tranfit package, SAND86-8246.
- [9] 오창보, 이창언, 대한기계학회논문집 B권, 제 25권 제8호, (2001), pp.1087-1096.
- [10] Dupont, V., J. et al. Institute of Energy, 66, (1993), p.20-28.