

희석된 메탄/산소 대향류 확산화염에서 확산-열 불안정으로 인한 화염의 비선형 동적 거동에 관한 수치해석

손 채 훈*

(2004년 1월 28일 접수, 2004년 4월 17일 심사완료)

A Numerical Study on Nonlinear Dynamic Behavior of Diffusive-Thermal Instability in Diluted CH₄/O₂ Counterflow Diffusion Flames

Chae Hoon Sohn

Key Words: CH₄/O₂ Diffusion Flames(메탄/산소 확산 화염), Nonlinear Dynamic Behavior(비선형 동적 거동), Diffusive-Thermal Instability(확산-열 불안정)

Abstract

Nonlinear dynamic behavior of diffusive-thermal instability in diluted CH₄/O₂ diffusion flames is numerically investigated by adopting detailed chemistry and transport. Counterflow diffusion flame is adopted as a model flamelet. Particular attention is focused on the pulsating-instability regime, which arises for Lewis numbers greater than unity, and the instability occurs at high strain rate near extinction condition in this flame configuration. Once a steady flame structure is obtained for a prescribed value of initial strain rate, transient solution of the flame is calculated after a finite amount of strain-rate perturbation is imposed on the steady flame. Transient evolution of the flame depends on the initial strain rate and the amount of perturbed strain rate. Basically, the dynamic behaviors can be classified into two types, namely non-oscillatory decaying solution and diverging solution leading to extinction. The peculiar oscillatory solution, which has been found in the previous study adopting one-step chemistry and constant Lewis numbers, is not observed in this study, which is attributed to both convective flow and preferential diffusion effects.

기호설명

a : 스트레인 율

c_p : 정압 비열

D_j : j -화학종의 질량 확산계수

f : 유동함수의 y 에 대한 상미분

h_j : j -화학종의 엔탈피

J : 고려하는 화학종의 개수

T : 온도

t : 시간

U_j : j -화학종의 확산속도

V : 상사함수 ($= \rho v$)

v : 축방향 속도

x, y : 공간좌표축

X_j : j -화학종의 몰분율

Y_j : j -화학종의 질량분율

w_j : j -화학종의 화학반응율

α : 혼합물의 열 확산계수

λ : 혼합물의 열전도도

μ : 혼합물의 점성계수

ρ : 밀도

$()_{-\infty}$: 연료측 외기 조건

* 회원, 조선대학교 항공우주공학과

E-mail: chsohn@chosun.ac.kr

TEL: (062)230-7123, FAX: (062)230-7123

()_∞ : 산화제측 외기 조건

1. 서론

자연계에 존재하는 화염은 외부적인 교란에 의해 영향을 받으며 과도적인(transient) 응답을 하게 된다. 특히, 화염에는 강한 비선형성을 갖는 화학반응이 내재되므로 비선형적인 동적(dynamic) 거동을 보이게 된다. 예를 들어 난류 유동장에 형성된 화염은 음향파나 다양한 시간 스케일을 갖는 난류 에디(eddy)들의 영향을 받게 되며, 이외에도 화염의 내부적인 불안정 요인으로 수력학적 불안정과 확산-열 불안정과 같은 고유 불안정 요인이 존재한다.⁽¹⁾

본 연구에서는 이와 같은 여러 가지 불안정 요인 중 확산-열 불안정으로 인한 화염의 맥동(pulsating) 불안정을 조사하고자 한다. 확산화염에서는 확산-열 불안정 현상이 드물게 관측되었으나 최근에 여러 연구^(2~5)와 실험⁽⁶⁾에 의해 Lewis 수, Le (열확산과 질량 확산의 비를 나타내는 무차원 수로서 a/D_j 로 정의됨)가 1보다 현저히 작은 경우에는 소염 띠(quenching-stripe)가 나타나며 1보다 큰 경우에는 맥동 불안정에 의한 화염 진동이 나타난다고 보고되었다. 특히 미소 중력장에서의 액적 연소 실험⁽⁶⁾은 큰 직경의 액적 화염이 소염되기 직전에 여러 싸이클동안 진동함을 보여주었다. 그리고 Sohn 등⁽⁷⁾은 비선형 수치해석을 통해 1보다 큰 Le 를 갖는 확산화염이 정상상태 소염조건에 도달하기 전에 맥동 불안정으로 인하여 진동하다가 결국 소염될 수 있음을 보였다. 한편 Sohn 등⁽⁸⁾은 Le 가 1보다 크지 않더라도 과도한 복사열손실에 의해 야기되는 소염조건 근처에서 맥동 불안정이 나타남을 보였다. 이러한 연구들^(7,8)을 통해 맥동 불안정의 근원은 과도한 열손실에 있음이 밝혀졌다.

그러나, 기존의 해석적 연구는 가상의 연료에 대한 일단계 화학반응모델을 채택한 해석이었기 때문에 현상적인 해석은 가능하지만 정량적인 화염 진동 조건 및 진동 자료를 제공하지 못하며, 이러한 연구에서는 각 화학종의 선호확산(preferential diffusion) 효과와 상산화학반응 효과를 고려할 수 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 몇 가지 최근의 연구들^(9~10)은 실제 연료를 채택하고 그에 따른 상산화학반응 및 전달 현상

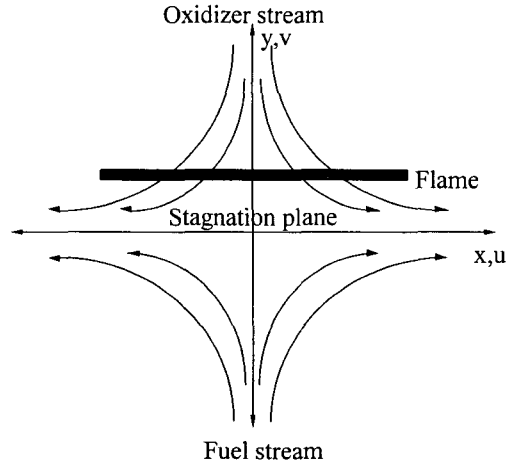


Fig. 1 Schematic diagram of diffusion flame established in axisymmetric counterflow

을 고려한 비선형 수치해석을 수행하여 정량적인 정보를 제공하였다. 실제 연료를 채택한 연구를 통해 과도한 복사 열손실에 의한 맥동 불안정은 실제로도 존재 가능하며, 흥미로운 현상과 메카니즘이 규명되었다.^(9~10) 그러나 Le 가 1보다 큰 화염에서의 맥동 불안정성은 Christiansen 등⁽¹⁰⁾의 연구에서 발생하는 것으로 보고되었지만, 채택한 화염이 구형 메탄화염으로 이상화되어 있기 때문에, 다른 화염 상황에서의 존재 가능성에 대해 여전히 의구심이 있다.

따라서 본 연구에서는 소화염(flamelet) 모델로 흔히 채택되는 메탄/산소 대향류 화염을 모델로 채택하고,⁽¹¹⁾ 회석제로 헬륨을 사용해서 연료와 산화제측의 Le 를 1보다 크게 만들어, 소염 조건 근처에서 맥동 불안정에 의한 화염의 비선형 동적 거동을 수치적으로 해석하였다. 이를 통해 Le 가 1보다 큰 연료/산화제 조합의 실제 확산 화염에서, 맥동 불안정성의 존재 가능성과 그 특성을 조사하고자 한다.

2. 지배방정식과 수치해법

실용 연소기에서 존재하는 난류화염을 직접 수치 모사에 의해 해석하기는 매우 어려우므로 이에 대한 대체 모델로서, 난류 화염을 단순화된 화염소들의 집합체로 간주하는 층류 화염소 모델이 제시되어왔다. 여러 모델 화염소 중 본 수치

계산에서 채택된 화염 모델은 Fig. 1에 나타낸 축대칭 대향류 유동장에 형성된 확산 화염이다. 이는 구형 화염소보다 좀 더 실제적인 화염소 모델로서, Sohn 등⁽⁹⁾의 연구에서 채택된 모델과 동일하다.

축대칭 대향류 유동장에 대해 경계층 근사를 적용하고 유동함수 f 을 도입하면 다음과 같은 비정상(unsteady) 일차원 질량, 운동량, 화학종, 에너지 보존 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial y} + 2a_{\infty}\rho f = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial f}{\partial t} + V \frac{\partial f}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial f}{\partial y} \right) - a_{\infty}\rho \omega + a_{\infty}\rho f^2 = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial Y_j}{\partial t} + V \frac{\partial Y_j}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_j U_j) - \omega_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + c_p V \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{j=1}^J \rho Y_j U_j c_{p_j} \frac{\partial T}{\partial y} + \sum_{j=1}^J \omega_j h_j = 0 \quad (4)$$

여기서 t 는 시간, y 는 축방향 좌표계, 유동 함수 f 의 y 에 대한 상미분 $f = u/u_{\infty}$, ρ 는 밀도, 축방향 질량 유속 $V = \rho v$, a 는 스트레인을, μ 는 점도, $-\infty$ 는 연료 경계층, ∞ 는 산화제 경계층, Y_j 는 j -화학종의 질량 분율, ω_j 는 화학 반응율, J 는 고려된 화학종의 개수, T 는 온도, c_p 는 정압 비열, λ 는 열전도도, h_j 는 엔탈피를 나타낸다. 축방향 확산 속도 U_j 의 계산을 위해서 Fick의 법칙과 확산 속도 보정 방법을 사용하였다.⁽¹²⁾ 상태 방정식으로는 이상 기체 상태 방정식을 사용하였다. 축대칭 대향류 유동장에서 산화제 경계층 스트레인은 $a_{\infty} = -(1/2)(dv_{\infty}/dy)$ 로 계산된다. 편의상 a_{∞} 를 a 로 나타내기로 한다.

상세화학반응 메커니즘으로는 Kee 등⁽¹³⁾이 제시한 58 단계의 기본화학반응으로 이루어진 반응 메커니즘을 사용하였다. 여기서는 CH_4 , CH_3 , CH_2 , CH , CH_2O , HCO , CO_2 , CO , H_2 , H , O_2 , O , OH ,

HO_2 , H_2O_2 , H_2O 와 He의 17개의 화학종이 고려되었다. 지배방정식에 포함되어 있는 화학반응항과 열역학적 물성치 및 전달 물성치의 평가를 위하여 각각 CHEMKIN-II⁽¹⁴⁾와 TRANSPORT PACK-AGE⁽¹²⁾를 사용하였다.

지배방정식 (1)-(4)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y \rightarrow -\infty; & \quad f = \sqrt{\rho_{\infty}/\rho} \\ & \quad Y_j = Y_{j-\infty}, \quad j = 1, 2, \dots, J \\ & \quad T = T_{-\infty} \\ y \rightarrow \infty; & \quad f = 1 \\ & \quad Y_j = Y_{j\infty}, \quad j = 1, 2, \dots, J \\ & \quad T = T_{\infty} \\ y = 0; & \quad V = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

수치 계산은 두 단계로 수행되었다. 먼저 지배방정식 (1)-(4)에서 과도항을 제거한 후, 스트레인을 a 에 따른 정상 상태(steady state) 해를 구한다. 다음, 과도항을 지배방정식에 포함시키고, 앞에서 구한 초기 정상상태 해로부터 스트레인을 을 갑자기 증가/감소시켜 야기되는 과도적인 화염 해를 구하여 화염의 동적 거동을 조사하였다. 과도해는 시간에 대해 2차의 정확도를 갖는 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 구하였다. 화염구조의 시간에 따른 천이 과정은 최대화염온도 T_{max} 를 관찰하므로써 파악하였다. 정확한 소염조건을 구하기 위해서 역수치해법(inverse numerical method)⁽¹⁵⁾을 이용하여 정상상태 화염구조의 윗가지(upper branch)와 중간가지의 경계가 되는 전환점(turning point)을 정확히 구하도록 하였다.

3. 결과 및 논의

메탄/산소 화염에서 연료측과 산화제측을, 분자량이 작은 헬륨으로 희석시키면 양 경계층에서 연료와 산화제의 Le 를 1보다 크게 만들 수 있다. 대표적인 계산 조건을 Table 1에 나타내었다.

이 표에서 X 는 물분율, a_{∞} 는 소염 스트레인을 을 나타낸다. 각 계산 조건에서 연료측의 Le_{CH_4} 는 2.65~2.66의 범위를 갖고, 산화제측의 Le_{O_2} 는 3.56~4.10의 범위를 가진다. 이러한 값들은 이전

Table 1 Fuel and oxidizer compositions for three calculation conditions

	Fuel side (X_{CH_4}/X_{He})	Oxidizer side (X_{O_2}/X_{He})	a_{ext}
Case 1	14%/86%	40%/60%	128.5 s ⁻¹
Case 2	12%/88%	17.5%/82.5%	0.50 s ⁻¹
Case 3	11%/89%	16%/84%	0.063 s ⁻¹

의 연구 결과^(7,10)에 비추어 볼 때, 맥동 불안정이 나타날 수 있는 충분히 큰 Le 에 해당함을 알 수 있다. 한편, 각 계산 조건에서 헬륨 첨가량에 따라 소염 스트레인이 크게 달라지며, 이에 따라 맥동 불안정에 미치는 유동의 효과 정도가 달라진다. 이를 정량적으로 살펴보기 위해 위의 세가지 조건을 설정한 것이며, 스트레인율의 값이 클수록 유속이 증가하므로 화염의 거동에 미치는 유동의 효과가 더욱 커지게 된다. Case 2의 경우 스트레인율이 $O(0.1 \text{ s}^{-1})$ 의 크기를 갖는 데, 이는 이전의 연구⁽⁹⁾에서 복사 열손실에 의해 맥동 불안정이 발생하여 화염 진동 현상이 뚜렷이 관찰된 상황에서의 스트레인율과 같은 크기이다. 따라서 이전의 연구결과⁽⁹⁾와 본 연구에서의 case 2의 결과는 유사한 유동 상황에서 각각 복사 열손실과 큰 Le 에 의해 맥동 불안정성이 발생하는지의 여부와 화염 거동을 서로 비교하여 살펴볼 수 있게 해준다.

앞서 언급한 연료/산화제 조성과 더불어 대기압하에서 $T_\infty = T_{-\infty} = 300 \text{ K}$ 의 경계조건에 대해 계산을 수행하였다.

3.1 정상 상태 화염 구조

교란으로 인한 화염의 동적 거동을 조사하기 전에, case 1에 대한 정상상태 화염 구조로서, 스트레인이율에 따른 화염온도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림은 전형적인 S자 형태 곡선의 윗가지를 보여주고 있다. 이 곡선상의 전환점은 소염점에 해당하며 Table 1에 기술했듯이, $a_{ext} = 128.5 \text{ s}^{-1}$ 이고, 이는 높은 스트레인이율에서 확산-반응간의 경쟁으로 유발되는 소염 조건을 나타낸다. 대항류 화염에서는 스트레인이율 a 가 증가할수록 연료와 산화제가 화염지역내에 잔류하는 시간이 짧아져서 불충분한 화학반응으로 인해 화염 온도가

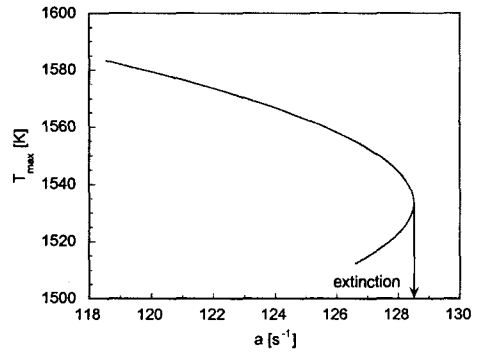


Fig. 2 Flame-temperature response curve with respect to strain rate in case 1

감소하며 화염이 얇아지게 되다가 어느 한도 이상으로 a 가 증가하면 소염된다.

본 연구에서 채택한 화염의 구조를 살펴보기 위해 $a = 120 \text{ s}^{-1}$ (case 1)에서의 화염 구조 계산 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 높은 스트레인이율로 인해 화학반응 지역이 정체점에 근접해 있으며, 열방출율 분포 곡선이 한 개의 극대점을 갖는 단일 반응지역 구조(single reaction-zone structure)를 갖는다.⁽¹⁵⁾ 화염의 두께는 온도 분포 곡선으로부터, 반응지역은 열방출율 곡선으로부터 결정한다. Figure 3b의 질량분율 분포는 메탄화염의 한 특성으로서 반응 지역에서 산소가 누출하는 특성을 보여주고 있다. Figure 3c에는 에너지 방정식을 구성하는 항들을 대류항, 확산항, 반응항으로 분류하여 각 항들이 위치에 따라서 서로 어떻게 균형(balance)을 이루는 지를 나타내었다. 이미 알려진 바와 같이 전달 지역(transport zone)에서는 대류와 확산이 반응 지역(reaction zone)에서는 확산과 반응이 균형을 이루고 있다. 이를 통해 메탄 화염이 헬륨으로 상당히 희석되더라도 기본 화염 구조는 변화하지 않으며, 또한 높은 스트레인이율을 갖더라도 반응 지역에서는 여전히 확산항과 반응항이 균형을 이룸을 알 수 있었다. 특히 후자의 사실은, 맥동 불안정에 있어 필수적인, 반응 지역에서의 질량확산과 열확산(열전도)의 역할이, 본 화염에서도 우세하게 나타날 것임을 암시한다. 따라서, 본 연구에서 채택한 화염은 일반적인 실제의 화염 구조를 가지면서 Le 가 1보다 큰 화염을 잘 모사하는 것으로 판단된다.

다른 경우(case 2, 3)에도 유사한 화염 구조를

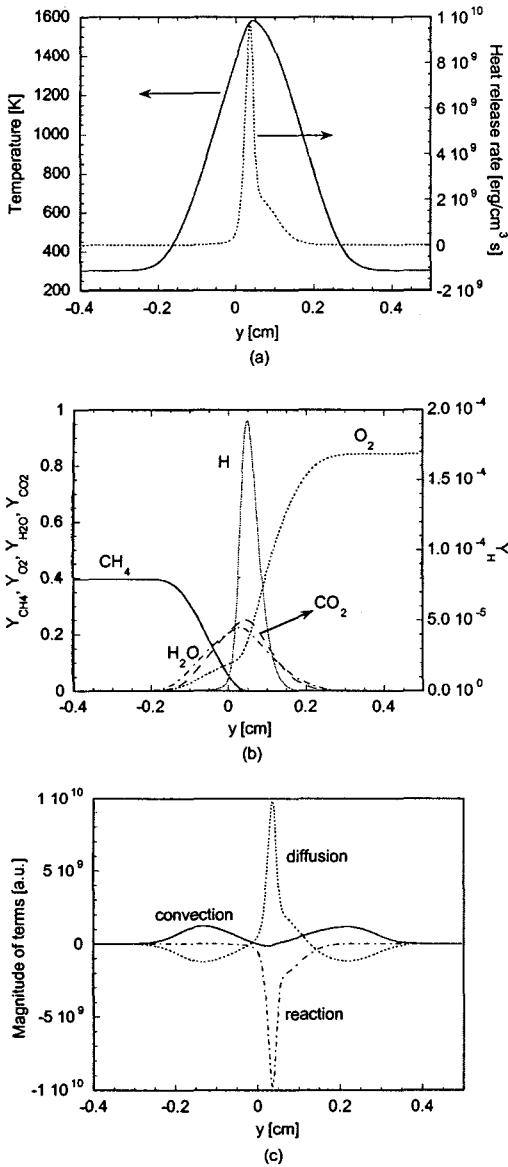


Fig. 3 Flame structures at $a=120 \text{ s}^{-1}$ in case 1 (a) temperature and heat-release-rate profiles, (b) mass-fraction profiles of major species, and (c) magnitudes of convection, diffusion, and reactions terms in energy equation

가지만, 추가적인 회색으로 인해 소염 스트레인을 울이 작아지기 때문에 화염이 정체점으로부터 멀어지고 상당히 두꺼워졌다. 그러나 반응 지역의

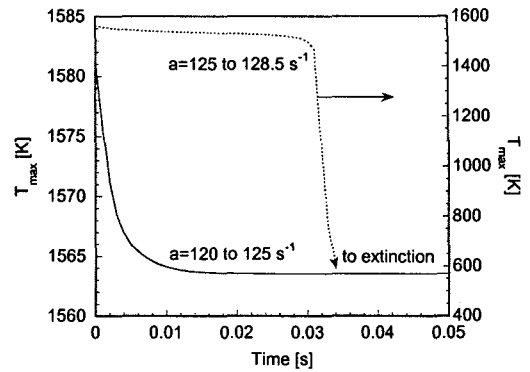


Fig. 4 Flame evolution behaviors exhibiting decaying solution and diverging solution to extinction in case 1

두께는 상대적으로 크게 두꺼워지지 않았다. 이는 스트레인 울의 감소로 화염이 두꺼워지더라도 회색울의 증가로 화학반응 강도가 약해져 반응지역은 넓어지기 어렵기 때문이다. 한편 Christiansen 등⁽¹⁰⁾의 연구에서 채택한 구형 화염의 구조는 본 연구에서 채택한 화염의 구조와 정성적으로 일치하므로, Christiansen 등⁽¹⁰⁾의 구형화염도 비교 대상의 화염으로 고려할 수 있다.

3.2 화염의 동적 거동

본 연구에서는 스트레인 울이 큰 소염 조건 근처 영역에서 맥동 불안정성에 의한 화염의 동적 특성을 연구 대상으로 하고 있다.

앞에서 구한 정상상태 해를 초기 조건으로하여 스트레인을 a 를 순간적으로 변화시키면 과도적인 화염구조가 전개된다. Case 1에 대해 과도 해석을 통해 화염의 동적 거동을 구한 결과, 이전의 결과^(7~10)와는 달리 맥동 불안정성에 의한 화염의 진동 현상 또는 진동하다가 소멸되는 현상이 나타나지 않았다. 즉 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, a 를 120 s^{-1} 으로부터 125 s^{-1} 로 섭동한 경우처럼 화염 온도가 단조적으로 감소하여 서서히 새로운 상태로 안정화되거나 또는 a 를 125 s^{-1} 로부터 128.5 s^{-1} 로 섭동한 경우처럼 서서히 화염 온도가 감소하다가 갑자기 소멸되는 양상만이 관찰되었다.

Case 2와 3의 경우에도 유사한 양상이 관찰되었고, 다만 가장 회색울이 높은 case 3에서는,

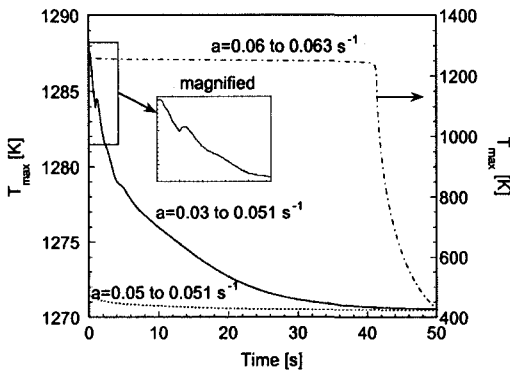


Fig. 5 Flame evolution behaviors exhibiting slightly oscillatory and monotonic decaying solutions and diverging solution to extinction in case 3

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 어떤 섭동의 경우에 1~2 사이클 정도의 미약한 진동 현상이 나타났다가(a 를 0.03 s^{-1} 으로부터 0.051 s^{-1} 으로 섭동한 경우의 거동 참고). 그러나 이 경우에도 역시 진동하다가 소멸되는, 맥동 불안정으로 인한 전형적인 화염 거동 양상은 나타나지 않았다. 또한 스트레인율이 낮은 case 3에서는 case 1에 비해 스트레인율 섭동에 대한 화염의 응답 및 그에 따른 거동이 상당히 느리게 진행되어 안정화되거나 소멸될 때까지의 소요시간이 상당히 길었다. 이는 화염의 응답 시간은 스트레인율의 역수에 비례함을 암시한다.

3.3 맥동 불안정 특성 고찰

앞 절에서 나타낸 계산 결과로부터, Le 가 1보다 큰 소염 조건 근처의 확산 화염에서 나타나는, 맥동 불안정의 전형적인 양상인 진동하다가 소멸되는 양상이 본 화염에서 나타나지 않음을 알 수 있었다. 따라서 정제 혼합층에서 일단계 반응을 채택한 화염의 맥동 불안정 연구 결과⁽⁷⁾에서 뚜렷이 나타난 화염 진동이, 본 화염에서는 나타나지 않은 이유를 분석하고자 한다. 이를 위해, 비교 분석 자료로서 본 연구 결과와 더불어 이전에 수행된 연구 결과들을 활용하였고, Table 2에 각각의 결과들을 요약하였다.

맥동 불안정은, 물질 확산과 열확산(열손실)의 불균형에 기인하며 이를 세분하여 $Le > 1$ 에 의한 경우와 과도한 복사 열손실에 의한 경우로 나눌

Table 2 Resultant summary of analyses of pulsating instability

	instability source	chemistry & transport	flame configuration	oscillatory behavior
study 1 (Ref. 7)	$Le > 1$	single step & constant Le	stagnant mixing layer	appreciable oscillation
study 2 (Ref. 8)	radiative heat loss	single step & constant Le	stagnant mixing layer	appreciable oscillation
study 3 (Ref. 9)	radiative heat loss	detailed chemistry & transport	counter-flow	appreciable oscillation
study 4 (Ref. 10)	$Le > 1$ or radiative heat loss	detailed chemistry & transport	spherical	moderate ($Le > 1$), appreciable (radiative)
present study	$Le > 1$	detailed chemistry & transport	counter-flow	not oscillatory

수 있다. Table 2에 요약되었듯이, 과도한 복사 열손실에 기인하는 경우에는 화학반응 및 전달 모델 또는 화염 형태와 무관하게 화염 진동 즉, 맥동 불안정성이 존재하였다. 그러나 $Le > 1$ 에 기인하는 경우에는 화학반응 및 전달 모델 또는 화염 형태에 따라 다른 양상이 관찰되었다. 본 연구에서는 실제 화염을 채택하였고, 이전의 연구⁽⁷⁾에서 고려하지 않은 (1) 상세화학반응 효과 및 전달 효과(선호 확산 효과), 그리고 (2) 대류 유동 효과를 고려하였다. 따라서 이 두가지 관점에서 맥동 불안정 특성을 고찰하였다.

3.3.1 상세화학반응 효과 및 선호 확산 효과

상세화학반응을 채택하는 경우, 일단계 반응에 비해 반응을 종결하기 위해 여러 단계의 화학반응 단계를 거쳐야 하므로 통상 응답 시간이 지연된다. 따라서 화염 거동의 양상에 영향을 미쳐 다른 거동이 나타날 수 있다. 그러나 복사 열손실 우세 영역에서의 맥동 불안정성을 연구한 결과⁽⁹⁾로부터, 상세화학 반응을 채택하더라도 화염 진동 양상이 나타남을 알 수 있었다. 따라서 상세화학반응 효과가 화염 진동 현상을 억제하는

근본 메커니즘은 아니다. 그러나 상세화학반응을 고려하는 경우, 개별 화학종마다 자기 다른 Le 를 고려하는 효과를 가져오므로 불안정화 경향에 간접적인 영향을 미칠 수 있다. 이는 다음에 설명하는 선호 확산 효과로부터 이해할 수 있다.

Le 가 1보다 클수록 화염은 더욱 불안정해지며, 맥동 불안정성이 더욱 강하게 나타난다. 그리고, 화염에 따라서 맥동 불안정성이 나타나는 최소 Le 가 다르며, 통상 그 최소 Le 는 1보다 약간 큰 값이라고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 일단계 반응을 채택한 이전의 연구⁽⁷⁾에서는 전 영역에서 연료와 산화제의 Le 가 일정하다는 가정을 도입하였다. 그러나, 실제 화염에서는 많은 화학종들이 존재하고, 선호 확산 효과에 의해 각 화학종 별로 자기 다른 농도분포를 가지며 위치에 따라 Le 가 변화하게 된다. 맥동 불안정에 있어서는 반응 지역에서의 Le 의 절대적인 값이 중요하므로, case 1에 대해 주요 화학종의 Le 의 공간적 분포를 Fig. 6에 나타내었다. Case 2, 3에 대해서도 유사한 분포를 보였다. 이 그림에서 보듯이, 연료인 메탄과 산화제인 산소는 반응 지역에서 Le 가 상당히 감소하였으나, 전 영역에서 Le 가 1보다 컸다. 그러나, H_2 와 H 의 Le 는 전 영역에 걸쳐 1보다 작은 값을 가졌다. 메탄화염의 화학반응에 있어, 연쇄 분지 반응과 재결합 반응 등 H_2 와 H 가 관여하는 화학반응이 상당히 중요한 역할을 한다.⁽¹⁶⁾ 경계층에서 연료와 산화제의 Le 를 1보다 크게 하더라도, H_2 와 H 의 물질 확산은 열확산보다 우세하며, 이로 인해 반응 지역에서 전반적인 또는 유효 Le (effective Lewis number)의 감소가 야기될 것이

다. 즉 물질 확산이 큰 화학종들에 의해 맥동 불안정이 발생하는 경향성이 완화되고 안정화 경향이 증가하게 된다. 상세화학 반응 및 전달 현상을 고려한 이전의 연구⁽¹⁰⁾결과는 $Le > 1$ 에 의한 맥동 불안정 계산시, 아주 좁은 영역에서 아주 서서히 진행되는 화염 진동이 관측되었다고 보고하였다. 과도한 복사 열손실에 기인하는 경우, 아주 뚜렷한 화염 진동 현상이 광범위한 영역에서 나타난 것과는 대조적인 결과이다. 이는 위에서 언급한 선호 확산 효과 때문이라고 설명할 수 있다.

3.3.2 대류 유동 효과

기존의 이론적인 선형 해석에서,⁽⁴⁾ 화염에 유입되는 대류 유동의 효과는 맥동 불안정 발생 영역을 감소시키며 아주 빠른 유동하에서는 소멸되는 것으로 보고되었다.

이전의 연구⁽¹⁰⁾에서 채택된 구형 화염과는 달리 본 연구에서 채택한 화염은 스트레치를 받는 화염이지만, 공통 인자로서 반응 지역에서의 속도를 바탕으로 유동의 효과를 고찰하겠다. 본 연구에서의 case 1, 2, 3, 그리고 참고문헌 (10)에서의 계산 결과로부터 반응 지역에서의 유동 속도 및 화염 거동을 정리하면 Table 3과 같다. 이로부터 유동 속도가 감소할수록 화염 진동 경향이 증대되고, 어느 이상의 유동 속도에서는 화염 진동 현상이 소멸됨을 알 수 있다. 결국, 대류 유동은 맥동 불안정의 발생 경향에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

대류 유동의 효과는 다음과 같이 이해할 수 있다. 반응 지역으로의 대류 유동은, 주위로부터 반응 지역으로의 물질 전달을 증진시키고 반응 지역

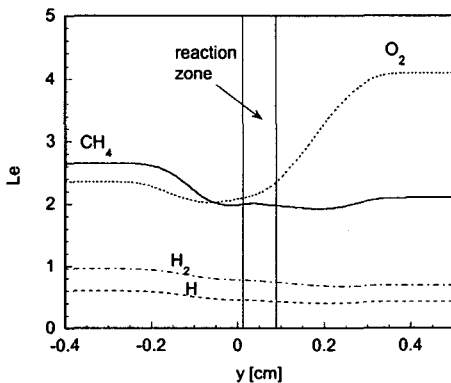


Fig. 6 Spatial distributions of Lewis numbers of major species at $\alpha=120 \text{ s}^{-1}$ in case 1

Table 3 Flow velocities in reaction zone in cases 1, 2, 3 & Ref. 10 and flame behaviors in each case

	case 1	case 2	case 3	Ref. 10
flow velocity [cm/s]	20	1.5	0.5	≈ 0.085
flame behavior	not oscillatory	not oscillatory	1~2 cycle oscillatory, but stabilized	moderate oscillation

으로부터 주위로의 열전달은 감소시키므로 결국 물질 확산율을 높이면서 열확산율은 감소시키는 효과를 갖게 된다. 결과적으로 선호 확산의 효과와 마찬가지로 유효 Le 의 감소 효과가 야기된다. 더구나 구형 화염과는 달리 대향류 화염에서는 반응지역을 둘러싸는 양쪽의 전달지역에서 반응 지역쪽으로의 유동이 형성되므로 그 효과가 더욱 크게 나타난다.

본 연구를 통해, 선호 확산 효과와 유동 효과에 의해서 유효 Le 가 감소하여 맥동 불안정을 야기하는 경향이 줄어들어, 화염 조건에 따라 맥동 불안정성이 소멸될 수 있다는 결론을 얻을 수 있다. 즉 선호 확산 효과와 유동 효과의 복합적인 작용에 의해 맥동 불안정 발생 여부가 결정된다.

한가지 이전의 연구⁽⁹⁾는 본 연구에서와 화염 형태와 화학반응 및 전달 모델이 같으며, 유일한 차이점은 맥동 불안정의 근원으로서 전자는 복사 열손실이고 후자는 1보다 큰 Le 라는 점이다. 그러나 두 연구는 모두 맥동 불안정성을 다루므로, 본 연구에서 얻은 결론을 이전의 연구 결과⁽⁹⁾의 분석에도 적용할 수 있다. 앞서 언급했듯이, 이전의 연구 결과⁽⁹⁾와 본 연구에서의 case 2의 유동 상황은 서로 거의 유사하다. 그런데 이전의 연구⁽⁹⁾에서는 맥동 불안정이 나타났고, 본 연구에서는 나타나지 않았다. 이는 전자의 경우, 맥동 불안정을 좌우하는 매커니즘이 열확산(열전도)이 아니라 복사 열손실이기 때문에, 선호 확산에 의해 상대적으로 물질확산(또는 열확산) 강도가 증가(또는 감소)하더라도(즉 유효 Le 가 감소하더라도) 불안정 발생에 미치는 영향이 없기 때문이다.

4. 결 론

대향류 유동장에 형성된 메탄/산소 확산화염에서 상세화학 반응 및 전달 현상을 고려한 수치해석을 통해 1보다 큰 Lewis 수에 기인하는 맥동 불안정성 특성을 조사하였다. 메탄과 산소는 각각 헬륨으로 희석하여 양쪽 경계층에서의 Lewis 수를 1보다 크게 만들었다. 헬륨으로의 희석 정도에 따라 세 가지 다른 계산 조건을 설정하였다.

정상상태 해로부터 본 연구에서 채택한 회석된 확산 화염의 구조를 분석하였고, 전형적인 확산 화염의 구조를 가짐을 확인하였다. 초기 정상상

태 해에 교란이 주어진 경우, 이전의 일단계 화학반응을 고려한 연구 결과와는 달리, 단조적으로 안정화되거나 소멸되는 두가지 양상의 동적 화염 거동을 관찰할 수 있었다. 즉 본 화염에서는 맥동 불안정에 의한 화염 진동 양상이 나타나지 않았다.

본 계산 결과와 이전의 연구 결과들을 토대로, 맥동 불안정 특성을 고찰하였다. 이를 통해 선호 확산 효과와 대류 유동 효과가 맥동 불안정성을 억제 내지 소멸한다는 사실을 규명하였다. 선호 확산 효과와 대류 유동 효과는, 반응 지역에서 유효 Lewis 수를 감소시켜 열확산에 비해 상대적으로 물질 확산의 강도를 증가시키므로 화염 안정화에 기여하였다. 따라서 실제 화염에 있어서, 특정한 화염 조건에 대해 선호 확산 효과와 유동 효과의 복합적인 작용 및 그 정도에 의해 맥동 불안정 발생 여부가 결정됨을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-D00045).

참고문헌

- (1) Strehlow, R. A., 1985, *Combustion Fundamentals*, McGraw-Hill, Inc.
- (2) Chen, R., Mitchell, G. B. and Ronney, P. D., 1992, "Diffusive-Thermal Instability and Flame Exinction in Nonpremixed Combustion," *Twenty-Fourth Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 213~221.
- (3) Kim, J. S., Williams, F. A. and Ronney, P. D., 1996, "Diffusional-Thermal Instability of Diffusion Flames with Lewis Numbers Close to Unity," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 327, pp. 273~301.
- (4) Kim, J. S., 1997, "Linear Analysis of Diffusional-Thermal Instability of Diffusion Flames with Lewis Numbers Close to Unity," *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 1, pp. 13~40.
- (5) Cheatham, S. and Matalon, M., 1996, "Heat Loss and Lewis Number Effects on the Onset of Oscillations in Diffusion Flames," *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The

- Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp. 1063~1070.
- (6) Nayagam, V. and Williams, F. A., 1998, "Dynamics of Diffusion Flame Oscillations Prior to Extinction During Low Gravity Droplet Combustion," *Seventh International Conference on Numerical Combustion*, York, England, Mar. 30 - Apr. 1, p. 46.
- (7) Sohn, C. H., Chung, S. H. and Kim, J. S., 1999, "Instability-Induced Extinction of Diffusion Flames Established in the Stagnant Mixing Layer," *Combustion and Flame*, Vol. 117, pp. 404~412.
- (8) Sohn, C. H., Kim, J. S., Chung, S. H. and Maruta, K., 2000, "Nonlinear Evolution of Diffusion Flame Oscillations Triggered by Radiative Heat Loss," *Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 95~106.
- (9) Sohn, C. H. and Chung, S. H., 2001, "A Numerical Study on Radiation-Induced Oscillatory Instability in CH₄/Air Diffusion Flames," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 25, pp. 29~35.
- (10) Christiansen, E. W., Tse, S. D. and Law, C. K., 2003, "A Computational Study of Oscillatory Extinction of Spherical Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 134, pp. 327~337.
- (11) Kim, H. J., Chung, S. H. and Sohn, C. H., 2003, "Nonlinear Acoustic-Pressure Responses of H₂/Air Counterflow Diffusion Flames," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 8, pp. 1158~1164.
- (12) Kee, R. J., Warnatz, J. and Miller, J. A., 1983, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Viscosities, Conductivities, and Diffusion Coefficients," *Sandia National Laboratories Report*, SAND83-8209.
- (13) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., 1990, "A Fortran Program for Modelling Steady Laminar One-Dimensional Premixed Flames," *Sandia National Laboratories Report*, SAND85-8240.
- (14) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "CHEMKIN-II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics," *Sandia National Laboratories Report*, SAND89-8009.
- (15) Sohn, C. H., Chung, S. H., Lee, S. R. and Kim, J. S., 1998, "Structure and Acoustic - Pressure Response of Hydrogen-Oxygen Diffusion Flames at High Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 115, pp. 299~312.
- (16) Sohn, C. H., Jeong, I. M. and Chung, S. H., 2002, "Numerical Study of the Effects of Pressure and Air-Dilution on NO Formation in Laminar Counterflow Diffusion Flames of Methane in High Temperature Air," *Combustion and Flame*, Vol. 130, pp. 83~93.