

복사 열손실에 의한 소염근처에서 셀모양 대향류 확산화염의 특성에 대한 수치해석

이 수 룡*

* 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Numerical Analysis of Characteristics of Cellular Counterflow Diffusion Flames near Radiative Extinction Limit

Su Ryong Lee*

* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Technology,

(Received January 14, 2014 ; Revised March 19, 2014 ; Accepted March 19, 2014)

Key Words: Cellular Instability(셀모양 불안정성), Counterflow Diffusion Flame(대향류 확산화염), Diffusional-Thermal Instability(물질확산-열확산 불안정성), Radiation Heat Loss(복사열손실)

초록: Damköhler수가 클 때 복사열손실에 의한 소염근처에서 셀모양의 대향류확산화염의 특성에 대하여 수치해석적으로 연구하였다. Lewis 수를 0.5로 두고 일차원 정상상태의 화염의 해에 매우 작은 교란을 가하여 시간에 따른 화염전개를 계산하였다. 천이과정 초기에는 선형안정성 해석에서 예측된 결과와 매우 비슷하게 진행된다. 시간이 증가함에 따라 증가율이 가장 강한 파동수를 갖는 교란파가 성장하고, 완전히 발달되면 소염영역과 화염영역이 번갈아 나타나는 셀모양의 화염구조를 갖는다. 화염온도는 총 엔탈피의 국소 이득 때문에 일차원 정상상태의 화염온도보다 높다. 셀모양의 확산화염은 Damköhler 수가 증가함에 따라 셀의 모양이 원형으로 되며 일차원 정상상태 소염조건보다 큰 Damköhler 수에서도 셀모양의 화염은 꺼지지 않고 살아남는다.

Abstract: Nonlinear characteristics of cellular counterflow diffusion flame near the radiative extinction limit at large Damköhler number are numerically investigated. Lewis number is assumed to be 0.5 and flame evolution is calculated by imposing an infinitesimal disturbance to a one-dimensional(1-D) steady state flame. The early stage of nonlinear development is very similar to that predicted in a linear stability analysis. The disturbance with the wavenumber of the fastest growing mode emerges and grows gradually. Eventual, an alternating pattern of reacting and quenching stripes is developed. The cellular flame temperature is higher than that of 1-D flame because of the gain of the total enthalpy. As the Damköhler number is further increased, the shape of the cell becomes circular to increase the surface area per unit reacting volume. The cellular flames do not extinguish but survive even above the 1-D steady state extinction condition.

- 기호설명 -

A_F : 연료측 혼합분율값
 a : 스트레인율 인자
 Da : Damköhler 수
 H : 총합엔탈피

K_p : Planck Mean Absorption 상수
 Q : 산화제의 질량당 열발생률
 q : 무차원 열발생률
 T : 온도
 T_a : 활성화 온도
 t : 무차원 시간
 x, y, z : 무차원 공간좌표
 Y : 질량분율
 Z : 혼합분율

† Corresponding Author, srlee@seoultech.ac.kr

그리스문자
 Θ : 무차원 온도
 κ : 복사 강도
 σ : Stefan-Boltzmann 상수

하첨자

c : 셀모양 불안정성
 ex : 소염조건
 F : 연료
 O : 산화제
 P : 평면교란 맥동 불안정성
 R : 복사열손실
 r : 화염면
 Z : 혼합분율
 ∞ : 산화제측

1. 서 론

예혼합화염과 마찬가지로 확산화염도 반응지역에서 물질확산이 열확산보다 크면 셀모양의 불안정성 (cellular instability)이 나타난다. Chen 등⁽¹⁾은 slot버너를 이용하여 여러 가지 연료/희석제의 농도를 변화시키면서 확산화염의 소염 및 화염불안정성을 연구하였다. Lewis 수가 1보다 작을 때 유동속도를 높이면 소염근처에서 강한 화염대와 약한 화염대가 번갈아 나타나는 셀모양의 불안정성이 나타나는 것을 관찰하였다. Kim 과 Lee⁽²⁾는 이차원 대향류 확산화염을 모델로 하여 일단계 총체반응에 대한 활성화에너지 점근법을 이용하여 선형안정성 해석을 하였다. Chen 등의 실험과 같이 Lewis 수가 1보다 충분히 작을 때 셀모양의 불안정성이 나타남을 보여주었다. Lee와 Kim⁽³⁾은 Lewis 수가 0.5일 때 셀모양의 확산화염에 대한 비선형 거동을 연구하였다. 예혼합화염에서는 셀의 구조가 매우 무질서하게 변화하지만, 확산화염에서는 화염위치가 화학양론면 주위의 비교적 작은 범위내로만 움직이기 때문에 셀구조는 상당히 규칙적이며 정지되어 있음을 보여주었다.

복사 열손실을 받는 확산화염은 Damköhler 수가 클 때와 작을 때 두 개의 소염점을 갖는다. Damköhler 수가 작을 때는 유동속도가 너무 커서 화학반응이 일어날 시간이 부족하기 때문에 소염이 일어나며 이를 반응속도 제한에 의한 소염이라 한다. Damköhler 수가 클 경우에는 복사열손실도 증가하여 화염온도가 감소하여 소염이 일어나며 이를 복사열손실에 의한 소염이라 한다. Lee⁽⁴⁾는 복사 열

손실을 받는 대향류 확산화염에 대하여 선형 안정성 해석을 수행하여 셀모양의 화염 불안정성 특성을 연구하였다. 반응속도 제한에 의한 소염근처에서는 복사열손실의 유무와 강도의 크기에 관계없이 화염 불안정성 특성이 거의 비슷하였다. 반면에 복사열손실에 의한 소염근처에서 화염불안정성은 셀모양의 화염불안정성 뿐만 아니라 맥동 불안정성이 함께 나타날 수 있어서 반응속도 제한 소염근처의 특성과 차이가 있음을 보여주었다.

Damkohler 수가 클 때, 즉 스트레치가 매우 작을 때, 복사 열손실을 받는 확산화염에서 소염 및 셀모양의 불안정성 등 화염 특성에 대한 연구가 아직 많이 부족하다. Han 등⁽⁵⁾은 다공성 버너(porous burner)를 이용하여 스트레치가 매우 작을 때 메탄 확산화염의 특성을 실험적으로 연구하였다. 스트레치가 매우 낮은 소염 근처에서 버너표면으로 열손실 혹은 복사열손실에 의하여 소염직전에 줄무늬 화염, 구멍모양 소염 등 여러 가지 형태의 화염불안정성이 나타남을 보여주었다. Nanduri 등⁽⁶⁾은 복사열손실을 받는 대향류 수소 확산화염에서 화염구조 및 비선형 거동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 반응속도 제한에 의한 소염영역에서는 복사열손실이 없을 경우와 마찬가지로 1차원 정상상태 소염조건 전에 셀모양의 불안정성이 일어나고 정상상태 소염조건보다 큰 유동속도에서도 화염이 살아남았다. 복사 열손실에 의한 소염영역에서는 소염되기 직전에 물결무늬(wavy), 정지된 셀모양, 움직이는 셀모양 등 다양한 불안정성이 존재하고 소염한계를 확장함을 보여주었다. Park 등⁽⁷⁾은 측면 열손실이 존재할 때 낮은 스트레치를 받는 대향류 확산화염의 에지화염(edge flame) 거동에 대하여 연구하였다. 반경방향 전도열손실에 의하여 에지화염이 진동하며, 진동모드는 증폭, 감쇄 그리고 조화 모드 등 세가지 형태가 있음을 실험적으로 밝혔다.

복사열손실을 받는 확산화염의 선형 안정성 해석의 Lee 결과⁽⁴⁾에 의하면 Damköhler 수가 큰 복사열손실에 의한 소염근처에서는 셀모양 뿐만아니라 맥동불안정성의 특성도 보여주고 있다. Han 등⁽⁵⁾의 실험에서도 스트레치가 매우 작을 때 열손실에 의하여 다양한 불안정한 현상이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이전 선형해석의 결과를 토대로 비선형 수치해석을 수행하여 Damköhler 수가 클 때 셀모양의 화염 발달(evolution) 및 소염특성에 대하여 연구하였다.

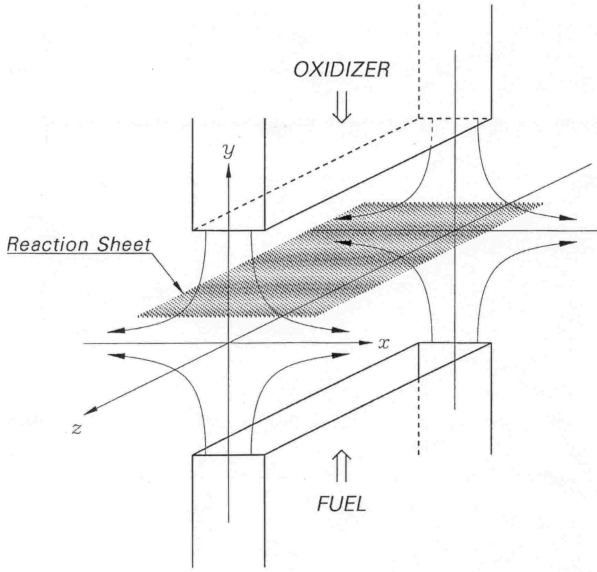


Fig. 1 Schematic diagram of the two dimensional counterflow diffusion flame

2. 지배방정식 및 해석방법

2.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서 해석 모델로 채택한 이차원 대향류 유동장을 Fig. 1에 도시하였다. 공간좌표 및 시간은 혼합층의 특성길이 $\sqrt{2\alpha^*/a^*}$ 와 특성시간 $2/a^*$ 로 무차원화 하였고, 온도와 산화제 및 연료의 농도는 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$(x, y, z) \equiv \sqrt{\frac{a^*}{2\alpha^*}} (x^*, y^*, z^*), \quad t \equiv \frac{a^* t^*}{2} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{T^* - T_\infty^*}{T_c^*} = \frac{T^* - T_\infty^*}{q T_\infty^*} \quad (2)$$

$$Y_O = \frac{Y_O^*}{Y_{O,\infty}^*} \quad Y_F = \frac{Y_F^*}{\nu Y_{O,\infty}^*} \quad (3)$$

여기에서 a^* 는 유동장의 변형률 인자(strain-rate parameter), α^* 는 열확산율, $T_c^* \equiv Q^*(Y_{O,\infty}^*/L)/c_p^*$, Q^* 는 산화제의 질량당 열발생, T_∞^* 는 산화제측의 온도, q 는 T_c^*/T_∞^* 로 정의된 무차원 열발생량이며, ν 는 연료-공기 화학양론비(stoichiometry), *는 실제 차원량(dimensional quantity)를 나타낸다.

연료 및 산화제의 Lewis 수들이 동일하다고 가정하였고 L 로 표시하였다. 열적 팽창을 무시하여 밀도를 일정하게 두었다. 화학반응은 산화제 및 연료의 반응 차수를 1로 하는 일단계 총체반응을 채택하였고 반응률은 다음과 같다.

$$\omega^* = \rho^* B^* Y_F^* Y_O^* \exp[-T_a/(1+q\theta)] \quad (4)$$

여기에서 B^* 는 빈도인자(frequency factor)이며, T_a 는 무차원 활성화온도이다.

기체복사는 광학적으로 얇다(optically thin)고 가정하였고,⁽⁸⁾ 복사열손실은 다음과 같다.

$$q_R^* = -4\sigma^* K_p^* (T^{*4} - T_b^{*4}) \quad (5)$$

여기에서 σ^* 는 Stefan-Boltzmann 상수이며 K_p^* 는 Plank mean absorption 상수이다. K_p^* 는 화학종 및 온도에 따라 변하는 물성치이지만, 해석상의 간편함을 위하여 많은 연구에서 화염면에서 K_p^* 를 상수(constant)로 두고 계산하고 있다.⁽⁸⁾ 본 연구에서도 K_p^* 를 상수로 두었다.

혼합분율(mixture fraction) Z 와 총엔탈피(total enthalpy) H 와 같은 연계함수(coupling function)를 다음과 같이 도입하였다.

$$Z \equiv \frac{Y_F - Y_O + 1}{A_F + 1}, \quad H \equiv \theta + \frac{Y_F + Y_O}{2} \quad (6)$$

각 변수들 및 지배방정식들에 대한 자세한 설명은 이전 논문을 참조하면 된다.⁽²⁾ 대향류 유동장에서 화학종 및 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$L \frac{DY_O}{Dt} - \nabla^2 Y_O = -Da Y_O Y_F \exp\left[-\frac{T_a}{1+q\theta}\right] \quad (7)$$

$$L \frac{DZ}{Dt} - \nabla^2 Z = 0 \quad (8)$$

$$\frac{DH}{Dt} - \nabla^2 H + \kappa Da [(1+q\theta)^4 - 1] = (1-L) \left[\frac{DY_F}{Dt} + \frac{DY_O}{Dt} \right] \quad (9)$$

여기에서 물질미분 D/Dt 와 Laplacian 연산기 ∇^2 는 각각 다음과 같다.

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} - 2y \frac{\partial}{\partial y}, \quad \nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (10)$$

또한 Da 는 collision Damköhler 수이며, κ 는 복사 열손실과 관련된 무차원 수로 다음과 같이 각각 정의되었다.

$$Da = 2B^* \nu Y_{O,\infty}^* / a^* \quad (11)$$

$$\kappa \equiv 4 \frac{\sigma^* K_p^* T_b^{*4}}{\rho^* Q^* B^* \nu} \quad (12)$$

κ 는 발생열에너지에 대한 복사열손실 에너지의 비를 표시하는 무차원 변수이다. 일반적으로 화염지역에서 K_p^* 값이 약 $O(10)$ 이며, 탄화수소의

일반적인 값들을 이용하여 κ 를 계산하면 약 $O(10^{-12}) \sim O(10^{-13})$ 정도가 된다.⁽⁸⁾

위 지배방정식의 경계조건은 다음과 같다.

$$Y_O \rightarrow 1, Z \rightarrow 0, H \rightarrow 1/2 \quad \text{as } y \rightarrow \infty \quad (13)$$

$$Y_O \rightarrow 0, Z \rightarrow 1, H \rightarrow A_F/2 \quad \text{as } y \rightarrow -\infty$$

2.2 수치해석 방법

먼저 주어진 Da 에 대하여 일차원 정상상태 화염을 계산한다. 정상상태 화염을 계산되면 매우 작은 외부교란을 부가한 후에 이차원 비정상 수치해석을 수행하였다. 선형안정성 해석에 의하면, 확산화염에서는 소염점 근처에서 화염이 불안정하므로 소염점 근처의 Da 에 대하여 해석을 수행하였다. 셀모양의 불안정성이 나타날 수 있도록 Lewis 수는 $L=0.5$ 로 두었고, $T_a=50$, $q=10$, $A_F=1$ 그리고 $\kappa=10^{-13}$ 으로 두었다.

지배방정식 (7) 과 (9)를 수치해석하기 위하여 공간적으로 2차 유한 차분방법 그리고 시간적분은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하였다. y 방향의 경계는 혼합경계층의 바깥에 해당하는 값을 선택하기 위하여 충분히 큰 값인 $y=\pm 5$ 로 두었고, 좁은 화염지역에서 온도와 농도값을 정확하게 계산하기 위하여 y 방향으로 총 500개의 격자를 두었다. 가로축인 z 방향은 외부 교란에 대하여 가장 빨리 성장하는 모드에 해당하는 파동이 약 5개 정도를 포함할 수 있도록 폭을 결정하였다. 선형 안정성해석에 의하면,⁽⁴⁾ 가장 빨리 성장하는 파동수(wave number)는 약 4 정도이며, 따라서 가로방향의 폭은 $z = \pm 5\pi/4$ 이 된다. 가로방향의 격자는 총 258 ($=2^8 + 2$) 개로 하였다. 시간적분을 위한 시간간격은 수치해석의 결과가 일치하는 최대크기 $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ 로 두었다.

3. 선형안정성의 특성

비선형 해석에 의한 화염 불안정성의 특징을 살펴보기 전에 선형 안정성해석의 이전의 결과를 검토할 필요가 있다. Fig. 2에 스트레치가 작을 때 복사 열손실에 의한 소염근처에서 교란의 파동수와 증가율의 분산관계(dispersion relation)를 나타내었다. 교란의 증가율은 파동수에 따라 복소수값과 실수값을 갖는다. 점선은 복소수의 실수부를 나타내고 실선은 실수값을 나타낸다. 증가율이 실수값을 가지면

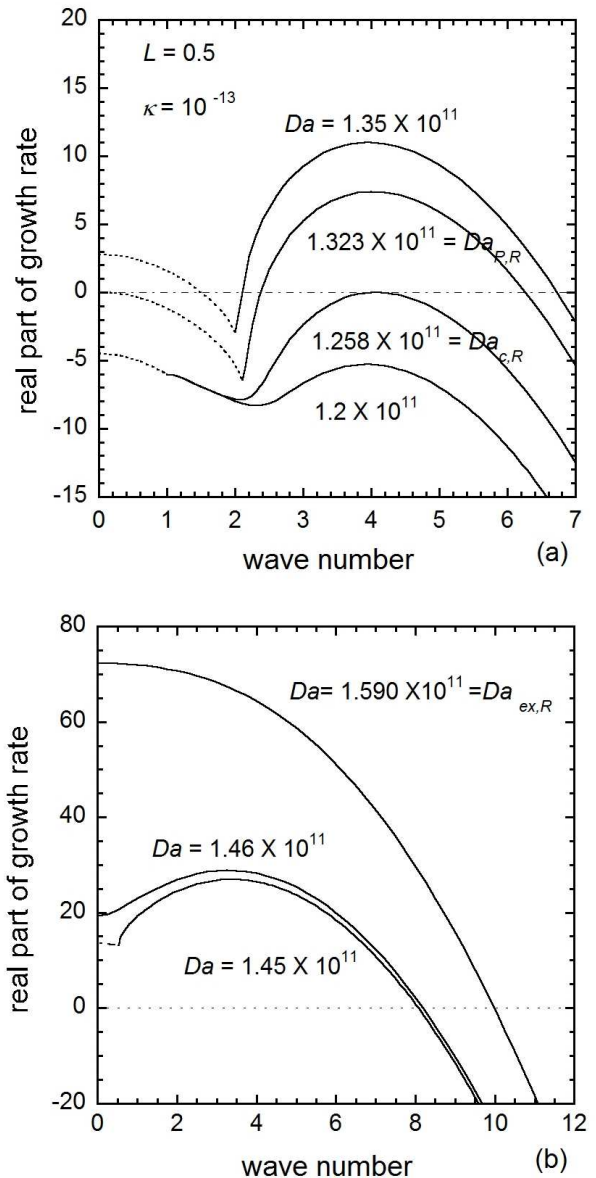


Fig. 2 Dispersion relation for the growth rate and the wave number near the radiative limit extinction with $L=0.5$ and $\kappa=10^{-13}$: (a) near the onset of cellular instability (b) near the steady-state extinction

교란이 시간에 따라 단조 증가 혹은 감소하며, 복소수값을 갖게 되면 시간에 따라 진동하면서 증가 혹은 감소하는 특성을 나타낸다. Fig. 2(a)에서 $Da = 1.2 \times 10^{11}$ 이면 증가율의 값 혹은 실수부의 값이 항상 음수이므로 화염은 모든 파장의 교란에 대하여 항상 안정되어 있다. Damköhler 수가 증가하여 $Da = 1.258 \times 10^{11}$ 이 되면 파동수가 4 근처에서 증가율이 0이 된다. Damköhler 수가 더욱 증가하면 화염이 불안정하게 되는 파동수의 영역이 확대되고 셀모양의 화염 불안정성이 나타날 수 있다. 특

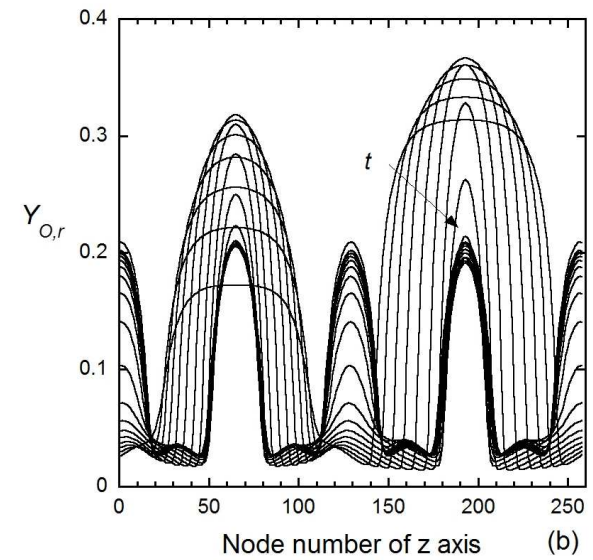
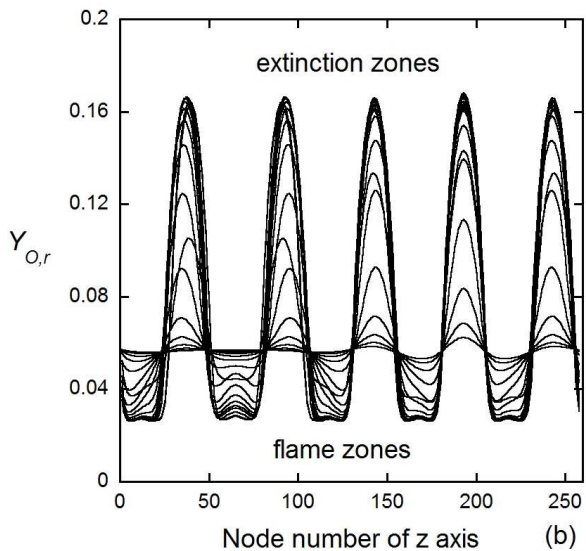
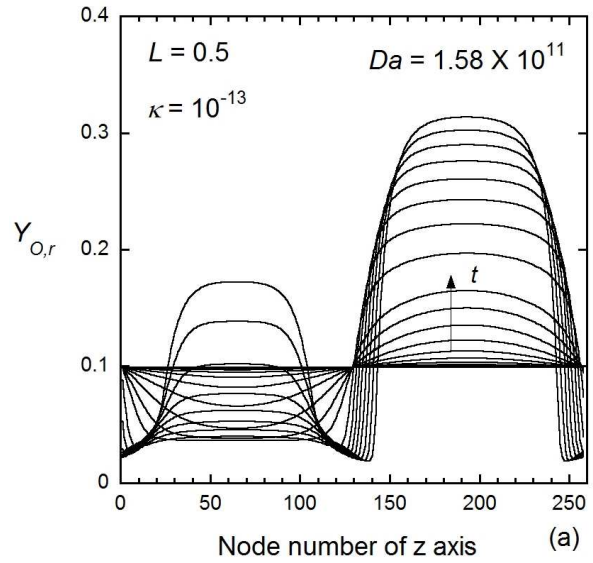
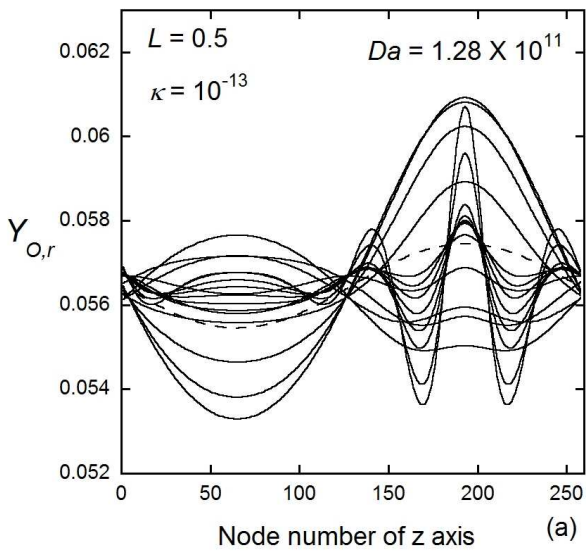


Fig. 3 Time evolution of the oxidizer concentration profiles at the reaction zone for $Da = 1.28 \times 10^{11}$ (a) from $t = 0$ to $t = 0.65$ and (b) from $t = 0.65$ to $t = 1.5$

Fig. 4 Time evolution of the oxidizer concentration profiles at the reaction zone for $Da = 1.58 \times 10^{11}$ (a) from $t = 0$ to $t = 0.3$ and (b) from $t = 0.3$ to $t = 3$

히 $Da = 1.323 \times 10^{11}$ 이면 파동수가 0 에서 증가율의 실수부가 0 보다 커져서 평면교란도 불안정하게 된다. Damköhler를 더욱 증가시키면 Fig. 2(b)에서 보듯이 셀모양의 불안정성이 나타나는 교란의 파장수 영역이 넓어지고 평면교란의 실수부도 점점 큰 양수값을 갖는다. $Da \geq 1.46 \times 10^{11}$ 에서는 교란의 증가율은 더 이상 복소수값을 갖지 않고 모든 파동수 영역에서 실수값을 갖는다.

4. 결과 및 검토

화염 불안정성에 의한 셀 모양 화염의 발달을

보기 위하여, 정상상태 화염의 산화제 농도장에 z 방향으로 진폭이 아주 작은 단일 정현파(single sine wave)를 추가하여 비선형해석을 수행하였다.

Damköhler 수를 셀모양의 불안정성이 나타나기 시작하는 임계 Damköhler 수 보다 조금 큰 $Da = 1.28 \times 10^{11}$ 로 일정하고 두고, 화염면에서 시간에 따른 산화제의 농도 발달을 Fig. 3에 도시하였다. 점선은 불안정성을 야기시키는 단일 정현파를 갖는 초기교란을 나타내며, 이 단일파의 파동수는 약 0.8 정도이다. 선형안정성 해석의 결과에서 보면 0.8의 파동수를 갖는 교란은 증가율이 복소수값을 갖기

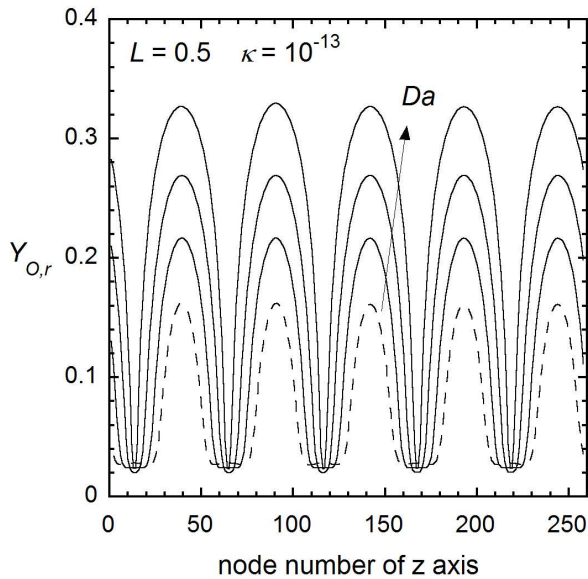


Fig. 5 The sublimit cellular flame structures for $Da = 2 \times 10^{11}$, 4×10^{11} and 1.5×10^{12}

때문에 가해진 교란은 공간적으로 위상이 바뀌면서 진동할 것으로 예측된다. Fig. 3 (a)에서 보면, 단일 정현파를 갖는 초기의 교란은 시간에 따라 위상이 서로 바뀌면서 진동하는 것을 볼 수 있으며, 비선형 해석에서 초기 화염 거동은 선형 안정성 해석의 결과와 매우 일치함을 알 수 있다. 그러나 증가율이 가장 빠른 파동수는 약 4 근처 이므로 시간에 따라 초기 파동수보다 작은 새로운 형태의 교란이 나타나기 시작한다. Fig. 3(b)에서 보듯이, 파동수 4를 갖는 새로운 교란은 시간에 따라 점점 진폭이 커지면서 최종적으로 5개 셀을 갖는 화염이 형성된다. 산화제의 농도가 작은 부분은 반응이 활발히 일어나는 화염지역이며, 산화제의 농도가 큰 부분은 반응이 매우 약해서 소멸되는 지역이다. 이렇게 형성된 셀모양 화염은 움직이지 않고 정지되어 있다. 따라서 열전도 및 물질확산에 의한 셀모양의 불안정성에 의하여 화염과 소멸지역이 번갈아 나타나는 셀모양의 화염이 나타남을 알 수 있다.

선형 안정성 해석에서 서로 다른 형태의 증가율을 갖는 화염들이 시간에 따라 셀모양의 불안정성이 어떻게 발달되어 가는지에 대하여 살펴보았다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, 정상상태 소멸 Damköhler 수 보다 조금 작은 $Da = 1.58 \times 10^{11}$ 에서는 $Da = 1.28 \times 10^{11}$ 의 경우와 달리 교란의 증가율이 항상 실수값을 갖는다. Damköhler 수를 $Da = 1.58 \times 10^{11}$ 로 일정하게 두고, 화염면에서 시간에 따른 산화제의 농도 발달을 Fig. 4에 도시하였

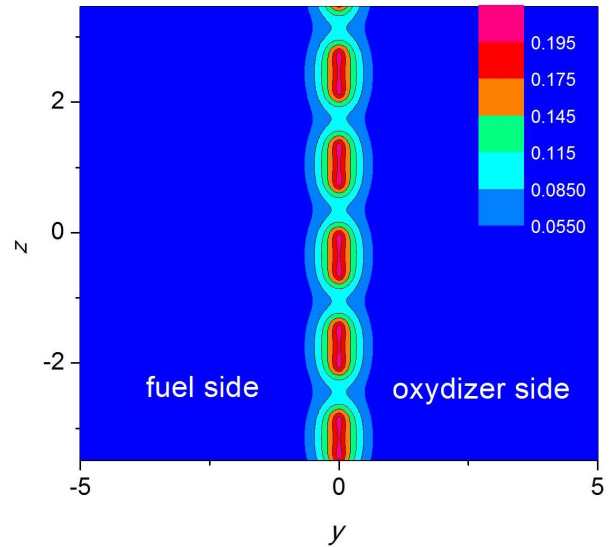


Fig. 6 Temperature contours for the cellular flame at $Da = 1.28 \times 10^{11}$

다. Fig. 4(a)를 보면, 시간이 진행됨에 따라 초기의 단일 정현파 교란은 농도의 교란값이 큰 부분은 계속 커지면서 소멸되고 교란값이 작은 부분은 반응이 강해지면서 화염이 강해진다. 초기의 화염 전개는 선형안정성 해석의 결과처럼 파동수가 10까지 항상 양의 실수값을 갖기 때문에 $Da = 1.28 \times 10^{11}$ 의 경우처럼 시간에 따라 위상을 바꾸면서 진동하지 않는다. 시간이 계속 진행되면, Fig. 4(b)에서 보듯이, 완전히 소멸된 영역이 줄어들고 화염지역의 일부 영역이 소멸되면서 불안정성이 더욱 강한 짧은 파장의 교란이 성장하고, 결국 5개의 셀모양 화염대가 형성된다.

셀모양 화염으로부터 발달되는 비선형 특성을 파악하기 위하여 Damköhler 수를 증가시키면서 화염의 구조를 살펴보았다. $Da = 1.28 \times 10^{11}$ 일 때 형성된 셀모양 화염을 초기조건으로 하여 소멸 직전까지 Damköhler 수에 따라 정상상태 소멸조건이후의 화염의 구조를 Fig. 5에 나타내었다. 점선은 $Da = 1.28 \times 10^{11}$ 일 때 셀모양의 화염을 나타내며, 화살표는 Damköhler 수가 증가하는 방향을 나타낸다. Damköhler 수가 증가함에 따라 화염지역은 좁아지고 소멸지역은 넓어짐을 알 수 있다. 특히 정상상태 소멸 Damköhler 수보다 훨씬 큰 $Da = 1.5 \times 10^{12}$ 까지 화염이 소멸되지 않고 살아남는다. 이는 Damköhler 수가 작아서 반응속도가 제한되어 소멸이 일어나는 영역에서 셀모양의 불안정성에 의해 소멸영역이 확장되는 것과 비슷한 결과를 갖는다. 이전의 결과⁽³⁾에 의하면, 반응속도 제한에 의한 소

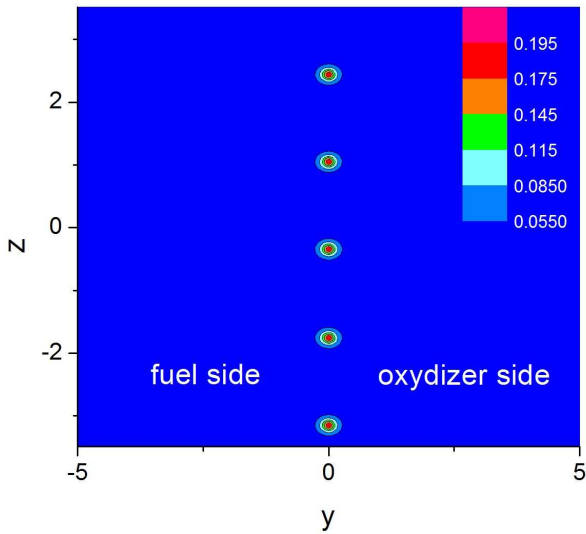


Fig. 7 Temperature contours for the cellular flame at $Da = 1.58 \times 10^{12}$

염영역에서 형성된 셀모양 화염구조는 각 화염마다 반응강도의 차이가 있었다. 이 때문에 Damköhler 수가 증가함에 따라 약한 화염대가 소염되어서 셀모양 화염들의 개수가 줄어들었다. 특히 소염되기 직전에는 1개의 셀모양 화염만 존재하였다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 복사 열손실에 의한 소염근처에서 셀모양 화염구조는 각 화염의 강도가 거의 일정하며, Damköhler 수가 증가함에 따라 복사 열손실이 증가하더라도 화염지역의 온도는 거의 변화가 없다. 이 때문에 반응속도 제한의 소염 영역과 달리, 처음 형성되었던 셀모양 화염들은 소염직전까지 계속 유지되며 소염시 전체 셀모양 화염들이 같이 소염된다.

Damköhler 수의 증가에 따른 셀모양 화염의 구조가 변화하는 모습은 화염면에서 온도분포를 도시하면 더욱 잘 알 수 있다. $Da = 1.28 \times 10^{11}$ 와 $Da = 1.58 \times 10^{11}$ 에서 y-z 평면에서 화염의 온도분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 도시하였다. Fig. 6에서 보면, 화염 불안정성에 의하여 형성된 초기 셀모양의 화염은 타원형의 모습을 갖고 있다. 화염 셀의 측면 소염지역을 통하여 연료와 산화제가 확산되어 들어오기 때문에 화염온도는 셀의 중심이 아니라 양 측면에서 제일 높다. 그리고 셀의 화염온도도 일차원 정상상태의 화염온도보다 더 높게 된다. Damköhler 수의 증가함에 따라 복사 열손실이 커져서 화염의 두께가 점점 줄어든다. 특히 타원형태의 셀 화염에서 x 방향보다 z 방향으로 크기가 크게 줄어서 점점 원형의 셀

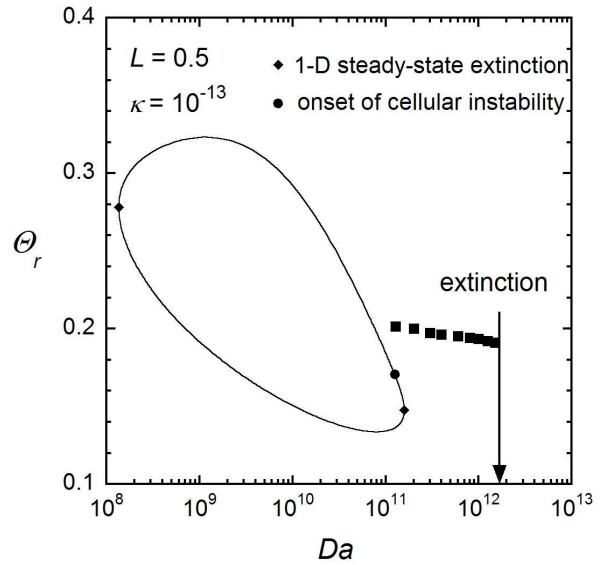


Fig. 8 The cellular flame response with increasing Damköhler

화염으로 변화된다. Damköhler 수가 더욱 증가하면 원형의 셀 화염들은 원형을 유지하면서 크기만 작아지게 된다. 이 때 화염 온도는 복사 열손실은 커지지만 셀의 주위에서 연료 및 산화제가 계속 확산되어 들어오기 때문에 거의 일정하게 유지된다. Fig. 7에는 소염되기 직전의 셀모양 화염의 온도분포를 보여주고 있다. 아주 작은 원형의 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 원형의 셀 화염의 크기가 더욱 작아지면 복사열손실 뿐만 아니라 주위 열확산이 커서 더 이상 화염을 유지하지 못하고 소염된다.

불안정성에 따른 셀모양의 화염에 대한 비선형 특성을 살펴보기 위하여 각 셀모양 화염의 최고 온도를 Damköhler 수에 따라 Fig. 8에 도시하였다. ■는 셀모양 화염온도를 나타내고, 실선은 일차원 정상상태 화염온도를 나타낸다. 정상상태 소염점들을 기준으로 위측 실선 줄기는 일차원 정상상태 화염이 존재할 수 있는 영역이며, 아래측 실선 줄기는 화염이 존재할 수 없는 불안정한 영역이다. 셀모양의 화염 불안정성은 정상상태 소염조건 근처인 $Da_{c,R} \leq Da \leq Da_{ex,R}$ 에서 일어난다. 셀모양의 화염이 형성되면 측면의 소염지역에서 연료 및 산화제가 확산되어 들어오기 때문에 총 엔탈피의 국소 이득(local gain)이 있어 화염온도가 일차원 정상상태 화염온도보다 훨씬 높음을 알 수 있다. 일단 셀모양의 화염이 형성되면 Damköhler 수가 증가하여 복사 열손실이 커진

다 하더라도 셀의 크기를 줄이면서 총 엔탈피의 국소 이득이 있기 때문에 화염온도가 감소하지 않고 계속 일정하게 유지된다. 이 때문에 일차원 정상상태 소염조건 보다 큰 Damköhler 수에 대해서도 셀모양의 화염들은 살아남을 수 있게 된다. 그러나 $Da \geq 1.59 \times 10^{12}$ 이면 각 셀 화염은 더 이상 유지되지 못하고 소멸된다.

4. 결 론

이차원 대향류 유동장을 모델로 하여 스트레치기작을 때 복사 열손실을 받는 셀모양 확산화염의 비선형 해석을 수행하여 불안정성의 특성을 연구하였다. 열확산에 비해 물질 확산이 클 때 셀모양의 불안정성이 나타나므로 Lewis 수를 0.5로 충분히 작게 두었다. Damköhler 수를 변화시키면서 일차원 정상상태 화염의 해로부터 불안정성에 의해 셀모양의 이차원 화염들로 천이되는 현상을 연구하였다.

셀모양의 불안정성은 일차원 정상상태 소염조건 근처에서만 일어난다. 천이 과정 초기에는 선형안정성 해석에서 예측된 결과와 매우 비슷하게 진행되며 시간이 갈수록 증가율이 가장 강한 파동수를 갖는 교란파가 성장한다. 완전히 발달되면 소염영역과 화염영역이 번갈아 나타나는 셀모양의 화염구조를 가지며 움직이지 않고 정지되어 있다. 셀모양의 화염구조에서 측면의 소염영역에서 연료 및 산화제가 화염으로 확산되어 들어오기 때문에 총 엔탈피의 국소이득이 있어 셀모양의 화염온도는 일차원 정상상태 화염의 온도보다 높다.

반응속도 제한에 의한 소염 근처에서는 Damköhler 수가 증가하면 상대적으로 약한 화염 셀이 꺼져서 셀의 개수가 줄어들었다. 그러나 복사열손실에 의한 소염근처에서는 Damköhler 수가 증가함에 따라 셀모양의 화염들은 셀의 개수는 그대로 유지하고 원형으로 변해간다. 화염온도도 소염지역으로부터 물질확산이 있기 때문에 감소하지 않고 일정하다. 일차원 정상상태 소염조건 보다 큰 Damköhler 수에서도 셀모양의 화염은 꺼지지 않고 살아남는다. Damköhler 수가 더욱 증가하여 원형의 셀모양 화염이 매우 작아서 더 이상 화염을 유지하기 힘들면 셀모양의 화염들이 소멸된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Chen, R., Mitchell, G. B. and Ronney, P.D., 1992, "Diffusive-Thermal Instability and Flame Extinction in Non-Premixed Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 24, pp. 213~221.
- (2) Kim, J. S. and Lee, S. R., 1999, "Diffusional-Thermal Instability in Strained Diffusion Flames with Unequal Lewis Numbers," *Combustion Theory and Modelling* Vol. 3, No. 1, pp. 123~146.
- (3) Lee, S. R. and Kim, J. S., 2002, "Numerical Simulations on Nonlinear Behaviors of Diffusional-Thermal Instabilities in Counterflow Diffusion Flames," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 26, No. 5, 2012, pp. 695~702.
- (4) Lee, S. R., 2013, "Linear Stability Analysis of Cellular Counterflow Diffusion Flames with Radiation Heat Loss," *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 18, No. 2, pp. 42~50.
- (5) Han, B., Ibarreta, A. I., Sung, C. J. and Tien, J. S., 2005 "Experimental Low-Stretch Gaseous Diffusion Flames in Buoyancy-Induced Flow Fields," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 527~535.
- (6) Nanduria, J. R., Sung, C. J. and T'ien, J. S., 2005, "Structure and Dynamic Response of Radiative Diffusion Flames," *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 9, pp. 515~548.
- (7) Park, J. S., Hwang D. J., Park J., Kim J. S., Kim S., Keel S. I., Kim T. K. and Noh D. S., 2006, "Edge Flame Instability in Low-Strain-Rate Counterflow Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 146, pp. 612~619.
- (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.