

메탄/공기 확산화염에서 복사 열손실로 인한 맥동 불안정에 관한 수치해석

손 채 훈* · 정 석 호**
(2000년 2월 3일 접수)

A Numerical Study on Radiation-Induced Oscillatory Instability in CH₄/Air Diffusion Flames

Chae Hoon Sohn and Suk Ho Chung

Key Words: CH₄/Air Diffusion Flames(메탄/공기 확산 화염), Oscillatory Instability(맥동 불안정), Radiative Heat Loss(복사 열손실)

Abstract

Radiation-induced oscillatory instability in CH₄/Air diffusion flames is numerically investigated by adopting detailed chemistry. Counterflow diffusion flame is employed as a model flamelet and optically thin gas-phase radiation is assumed. Attention is focused on the extinction regime induced by radiative heat loss, which occurs at low strain rate. 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. Depending on the initial strain rate and the amount of perturbed strain rate, transient evolution of the flame exhibits various types of flame-evolution behaviors. Basically, the dynamic behaviors can be classified into two types, namely oscillatory decaying solution and diverging solution leading to extinction.

1. 서 론

난류 유동장에 형성된 화염은 전파하는 음향파나 다양한 시간 스케일을 갖는 난류 에디(eddy)들의 영향을 받게 된다. 이러한 외부적인 교란 요인 외에도 화염의 내부적인 불안정 요인으로 수력학적 불안정과 확산-열 불안정과 같은 고유 불안정 요인이 존재한다.⁽¹⁾

Damköhler 수, Da 가 큰 평형조건 근처의 화염에서는 특성 화학반응 시간이 매우 짧기 때문에 유동 교란에 대해 즉각적으로 응답하여 새로운 화염 조건을 찾아갈 수 있다. 반면, 소염 조건 근처의 화염에서는 특성 화학반응 시간이 상대적으로

로 길고 유동 교란에 대해 매우 민감하게 응답하므로 독특한 화염의 거동이 나타날 수 있으며 정상 상태 해와는 다른 비선형적인 동적 거동을 보일 수 있다. 이로 인해 소염 조건 근처의 화염 구조는 정상상태 해를 통해서 예측할 수 없으며 완전한 과도상태 해석을 통해서만 그 동적거동을 파악할 수 있다.

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 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

* 회원, 한국항공우주연구소

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : shchung@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7114 FAX : (02)883-0179

여러 사이클동안 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 소멸될 수 있음을 보였다. 한편 손과 김⁽⁸⁾은 Le 가 1보다 크지 않더라도 복사열손실에 의해 야기되는 소염조건근처에서 맥동 불안정이 나타남을 보였다. 이러한 연구들^(7,8)을 통해 맥동 불안정의 근원은 과도한 열손실에 있음이 밝혀졌다.

그러나, 기존의 연구는 액적 연소 실험⁽⁶⁾을 제외하고는 모두 가상의 연료에 대한 일단계 화학반응모델을 채택한 해석이기 때문에 현상적인 해석은 가능하지만 정량적인 화염 진동 조건 및 진동 자료를 제공하지 못하며, 이러한 연구에서는 각 화학종의 선호확산(preferential diffusion) 효과와 상세화학반응 효과를 고려할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 매탄/공기 확산화염에서 상세화학반응을 고려한 비선형 수치해석을 수행하고자하며 이를 통해 화염의 정량적인 동적 거동을 조사하고자 한다.

2. 지배방정식과 수치해법

실용 연소기에서의 연소 상황은 난류유동으로, 직접 수치 모사에 의한 해석이 매우 어렵다. 따라서 이에 대한 대체 모델로서, 난류 화염을 단

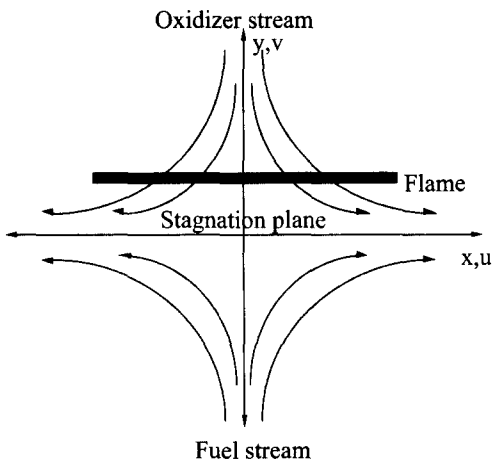


Fig. 1 Schematic diagram of diffusion flame established in axisymmetric counterflow

순화된 화염소들의 집합체로 간주하는 층류 화염소 모델이 제시되었다. 여러 모델 화염소 중 본 수치 계산에서 채택된 화염 모델은 Fig. 1에 나타난 축대칭 대향류 유동장에 형성된 확산 화염이다. 이는 Sohn 등⁽⁹⁾의 연구에서 채택된 모델과 동일하며 다만 본 계산에서는 복사 열손실 효과와 과도항(transient term)이 추가로 고려된다.

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.

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

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

$$\rho \frac{\partial Y_j}{\partial t} + V \frac{\partial Y_j}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Y_j U_j) - \omega_j = 0, \tag{3}$$

$j = 1, 2, \dots, J$

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

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 반응률, J 는 고려된 화학종의 개수, T 는 온도, c_p 는 정압 비열, λ 는 열전도도, h_j 는 엔탈피, q_r 은 단위체적당 복사 열손실율을 나타낸다. 축방향 확산 속도 U_j 의 계산을 위해서 Fick의 법칙과 확산 속도 보정 방법을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 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.

메탄 화염에 대해서는 기체상 매질의 광학적 두께가 0.1 이하로 상당히 얇다고 알려져 있다.⁽¹¹⁾ 따라서, 복사 열손실을 계산하기 위해서 매질의 광학적 두께가 충분히 얇다는 가정하에서 유도된 다음의 복사 열손실유식을 고려한다.

$$q_r = -4\sigma K_p (T^4 - T_b^4) \quad (5)$$

여기서 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며, K_p 는 Plank 평균 흡수 상수, 하첨자 b 는 경계를 나타낸다. 메탄 화염에서 복사에 관여하는 중요한 화학종은 CO_2 , H_2O , CO , CH_4 이다. K_p 를 이들 화학종의 부분압과 각 화학종의 Plank 평균 흡수 상수로 나타내면 다음과 같다.

$$K_p = P_{CO_2}K_{CO_2} + P_{H_2O}K_{H_2O} + P_{CO}K_{CO} + P_{CH_4}K_{CH_4} \quad (6)$$

이 식에서 K_p 계산을 위해 필요한 각 화학종의 Plank 평균 흡수 상수 값으로는, Tien⁽¹²⁾이 제시한 자료를 다음과 같은 온도에 대한 5차의 다항식으로 곡선 맞춤하여 사용하였다.⁽¹¹⁾

$$K_i = \sum_{j=0}^5 A_{ij} T^j, \quad i=1, \dots, 4 \quad (7)$$

계수 A_{ij} 의 값은 참고문헌⁽¹¹⁾에 제시되어 있다. 상산화학반응 메커니즘으로는 Kee 등⁽¹³⁾이 제시한 58 단계의 기본화학반응으로 이루어진 반응메커니즘을 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 N_2 의 17개의 화학종이 고려되었다. 지배방정식에 포함되어 있는 화학반응항과 열역학적 물성치 및 전달 물성치의 평가를 위하여 각각 CHEMKin-II⁽¹⁴⁾와 TRANSPORT PACKAGE⁽¹⁰⁾를 사용하였다.

지배방정식 (1)-(4)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} y \rightarrow \infty ; & \quad f = 1 \\ Y_j &= Y_{j\infty}, \quad j = 1, 2, \dots, J \\ T &= T_\infty \\ y = 0 ; & \quad V = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

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 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. 복사 열손실이 존재하는 경우 두 개의 정상상태 소염조건이 존재하는데,^(8,11) 정확한 소염조건을 구하기 위해서 역수치해법 (inverse numerical method)을 이용하여 정상상태 화염구조의 윗가지와 중간가지의 경계가 되는 전환점(turning point)을 정확히 구해야 한다. 대항류 화염에서 정확한 소염점을 구하기 위한 역수치해법은 참고문헌 (15)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

3. 결과 및 논의

3.1 정상 상태 화염 구조

대기압하에서 $T_\infty = T_{-\infty} = 300$ K, $Y_{CH_4-\infty} = 1.0$, $Y_{O_2-\infty} = 0.21$, $Y_{N_2-\infty} = 0.79$ 의 경계조건에 대해 계산을 수행하였다. 교란으로 인한 화염의 동적 거동을 조사하기 전에 정상상태 화염 구조를 Fig. 2에 나타내었다. 정상 상태해는 닫힌 폐곡선 형태를 보여주고 있다. 폐곡선상에 두 개의 전환점(turning point), 즉 소염점이 존재하는데 하나는 널리 알려진 높은 스트레인을에서 확산-반응간의 경쟁으로 유발되는 소염 조건($a_{HE} = 205$ s⁻¹)에 해당하며, 다른 하나는 낮은 스트레인을에서 복사 열손실에 의해 야기되는 소염조건($a_{LE} = 0.545$ s⁻¹)이다. 이러한 소염 스트레인을, a_{LE} 는 Maruta 등⁽¹⁶⁾의 연구결과와 부합하는 것이다.

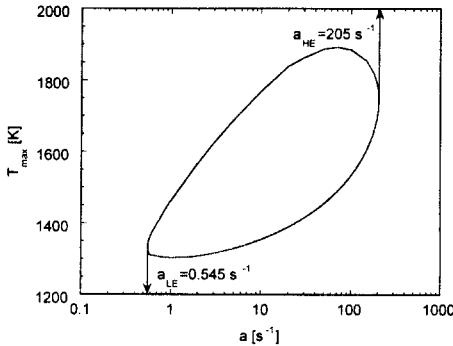


Fig. 2 Flame-temperature response curve with respect to strain rate

대향류화염에서 Da 는 스트레인을 반비례한다. a_{HE} 로부터 출발하여 a 가 감소하면 화학반응 강도가 증가하기 때문에 a 가 감소할수록 화염 온도가 상승하게 된다. 그러나 어느 한도 이하로 a 가 감소하게 되면 화염이 두꺼워져 복사 열손실 효과가 증가하여 화염 온도는 감소하기 시작한다. 정상상태 해석 결과, 스트레인이 a_{LE} 와 a_{HE} 사이의 범위에 있어야 물리적으로 화염이 존재할 수 있다. 이를 토대로 두 개의 전환점보다 상부에 위치한 정상상태 해를 두 영역으로 구분할 수 있다. 하나는 a_{HE} 로부터 최고 화염 온도 지점까지의 정상상태 해이며, 다른 하나는 최고 화염 온도 지점부터 a_{LE} 까지이다. 두 번째 영역을 복사 열손실 우세 영역이라 부르며, 본 연구에서는 이 영역에서 맥동 불안정성에 의한 화염의 동적 특성을 연구 대상으로 하고 있다.

3.2 화염의 동적 거동

앞에서 구한 정상상태 해를 초기 조건으로 하여 스트레인을 a 를 순간적으로 변화시키면 과도적인 화염구조가 전개된다. 이러한 스트레인 섭동은, 난류화염에서 화염소가 받게 되는 유동 교란을 모사하기 위한 것이다. 본 연구에서는 복사 열손실 우세 영역에서 화염이 보여주는 동적 거동에 초점을 맞추었다.

과도 해석을 통해 화염의 동적 거동을 구한 결과, 이전의 결과⁽⁸⁾와 마찬가지로 맥동 불안정에 의해서 화염이 정상 상태 소염 조건($a_{LE}=0.545\text{ s}^{-1}$)에 도달하기 이전에 아주 작은 스트레인 섭동에 의해서 진동하다가 소염되는 현상이 관찰되었

다. 이러한 거동이 나타나기 시작하는 초기 정상 상태 해를 분기점(bifurcation point)이라고 부르고 이때의 스트레인을 분기 스트레인을 a_{bif} 라고 부른다. 즉, 스트레인이 a_{LE} 보다 크더라도 a_{bif} 보다 작으면 미소한 외부 교란에 의해서도 화염이 소염된다. 본 계산에서 $a_{bif} = 0.650\text{ s}^{-1}$ 이었다. 즉, 교란이 존재하는 실제 유동장에서 화염이 존재할 수 있는 구간은 $a_{bif} < a < a_{HE}$ 로써, 정상상태로 존재할 수 있는 구간인 $a_{LE} < a < a_{HE}$ 보다 좁아지게 된다.

다양한 초기 조건과 섭동량에 대해 화염 거동을 계산한 결과, 동적 거동 양상은 크게 두 가지로 분류할 수 있었다. 하나는 화염진동을 거쳐 안정한 화염구조로 수렴되어 가는 양상 I이며, 다른 하나는 화염진동을 거쳐 결국 소염으로 이어지는 양상 II이다. 그리고 이전의 연구⁽⁸⁾와는 달리 일정한 진폭을 가지며 영구히 진동하는 무한 순환해(limit-cycle solution)는 존재하지 않았다.

화염 거동의 첫 번째 양상을 보여주는 계산 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 스트레인이, 초기 스트레인 $a_i = 2.0\text{ s}^{-1}$ 에서 1.7 s^{-1} 로 섭동된 경우(Fig. 3(a)), 그림에서 볼 수 있듯이 화염은 초기 단계에서 한 주기 진동후 곧바로 안정한 화염구조로 수렴하였다. 이러한 거동은 초기 스트레인이 소염조건 a_{LE} 로부터 멀리 떨어져 있고 스트레인의 섭동량이 작은 경우 발생하였다. Fig. 3(b)는, 같은 초기 스트레인에 대해서 스트레인의 섭동량이 큰 경우의 화염 거동을 보여준다. 초기에 여러 주기 동안 진동하다가 서서히 안정한 화염구조해로 접근하는 거동을 보여주었다. 정상상태 초기조건에서 스트레인이 갑자기 감소할 때, 화염의 T_{max} 가 진동하는 이유는 다음과 같다. 스트레인이 순간적으로 감소하면 반응지역 내 반응물의 잔류시간이 길어져 충분한 화학반응이 이루어지므로 열방출량이 증가하여 온도가 상승하게 된다. 그러나 낮아진 스트레인으로 인해 더 두꺼워지고 더 고온이 된 화염으로부터의 복사 열손실이 증가하게 되어 화염온도는 감소하게 되며 이로인해 반응지역에서 반응을 종결하지 못하고 누출되는 반응물의 양이 증가하게 된다. 이렇게 되면 반응물의 양이 증가하므로 다시 반응률이 증가하여 열방출률이 커지므로 온도가 증가하게 되며, 그 후 다시 복사 열손실로 온도가 감소하여 위의 에너지 변환 과정을 반복하게 된

다. 화염조건, 즉 a_i 와 a_p 에 따라 진동 주기와 시간, 진폭의 증폭/감쇠 여부가 달라진다.

초기 스트레인을 분기 스트레인에 근접한 경우(Fig. 3(c)), 매우 규칙적인 형태의 진동을 거쳐 단계적으로 최종 상태에 수렴해 간다. 이전의 연구⁽⁸⁾는 진동 후 안정한 화염 구조로 수렴되어 가는 양상을 보여주기는 하지만, 진동하는 동안 매 주기마다 진폭의 평균값을 취하면 어느 순간

에서도 거의 0이 된다. 즉, 진동하는 동안의 T_{max} 의 평균값을 취하면 평균값이 어느 순간에서나 거의 최종 상태 수렴값과 같게 된다. 이러한 거동은 비현실적이며 화학적에너지와 열에너지간의 변환이 일단계로 이루어질 때만 가능하다. 다단계 화학반응을 고려하는 경우, 특성화학반응 시간이 모두 다른 개별적인 화학반응들로 이루어진 여러 반응 경로를 거쳐야 반응물의 화학적에너지가 열에너지로의 변환된다. 따라서 열에너지로의 변환 지연(lag)이 존재하므로 매 주기 마다의 열에너지 회복(recovery)이 불완전하여 Fig. 3(c)에서 보듯이 T_{max} 의 평균값이 시간에 따라 감소해가면서 최종상태 값으로 수렴해가게 된다.

화염 진동의 두 번째 양상을 보여주는 계산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 스트레인이 소염조건으로부터 멀리 떨어져있고 섭동된 스트레인이 분기 스트레인보다 작은 경우의 화염거동을 Fig. 4(a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 초기에 진동하다가 온도가 단조 감소하는 과정을

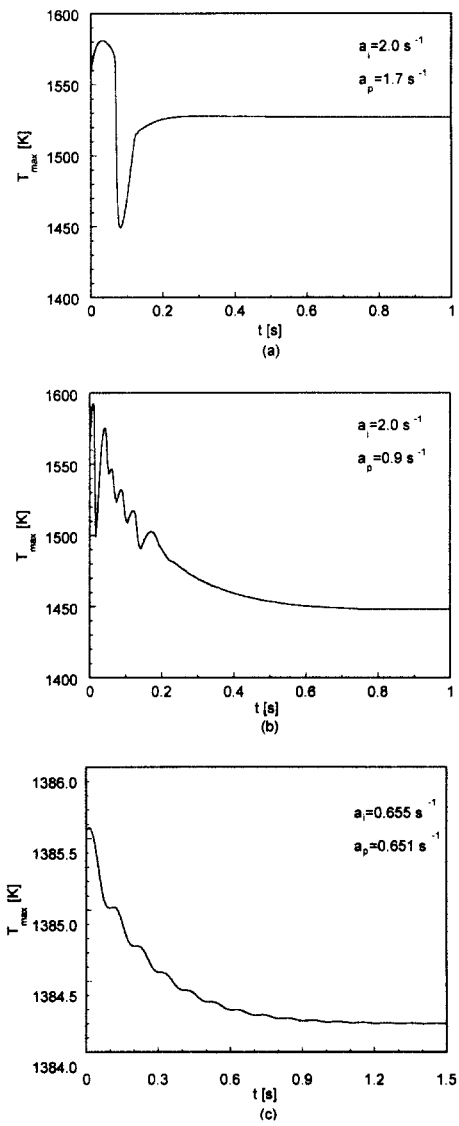


Fig. 3 Various types of flame evolution behaviors for oscillatory decaying solution

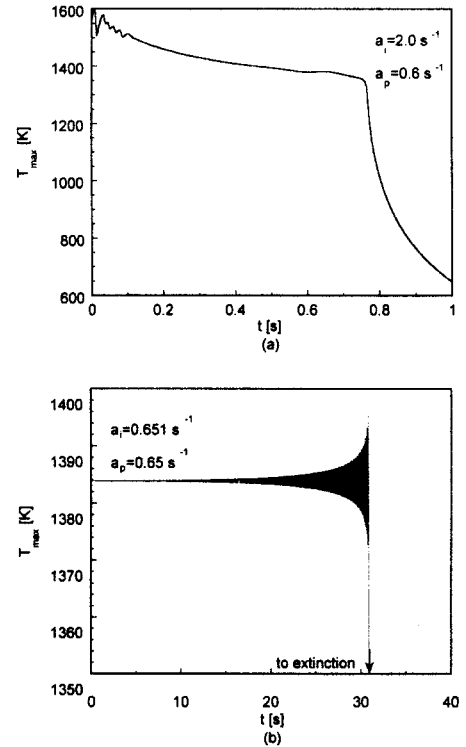


Fig. 4 Various types of flame evolution behaviors for diverging solution

거쳐 급격히 온도가 감소하면서 소멸되는 거동을 보여준다. 이에 반해서 초기 스트레인율이 분기 스트레인율에 근접해 있고 스트레인율 섭동량이 작은 경우, Fig. 4(b)에서 보듯이 화염이 초기에는 a_p 값에 해당하는 화염구조에 접근해가다가 조금씩 진동하면서 서서히 진폭이 증가하여 결국 진폭이 커져 소멸되는 거동을 보여 준다. 진동 주기는 약 0.125 s 이며 화염이 진동하는 시간은 약 30초 정도로 상당히 긴 시간동안 진동하였다. 진동 지속 시간은 초기 조건과 스트레인율 섭동량에 따라 달라지며 초기 조건이 분기 스트레인율에 근접할수록, 섭동량이 작을수록 길어진다.

이상은 스트레인율을 감소시켰을 경우의 화염 거동을 설명한 것이다. 스트레인율을 증가시키는 경우에는 Fig. 4(b)의 거동이 나타나지 않는다는 점을 제외하고는 감소시키는 경우와 유사한 거동이 나타났다. 즉 화염 진동의 양상도 두가지가 존재하며 각 양상에서의 화염 거동 특성과 각 거동이 나타나는 조건도 동일함을 알 수 있었다.

전술하였듯이 본 계산에서는, 이전의 일단계 반응을 이용한 계산⁽⁸⁾과는 달리 무한 순환해가 나타나지 않았다. 왜냐하면 다단계 반응을 고려하면 화학적에너지와 열에너지간의 변환이 어느 순간에서나 항상 완전하게 보존적으로 이루어지지 못하기 때문이다.

3.3 상세화학반응의 효과

화염이 진동하다가 새로운 정상상태로 수렴되거나 진폭이 증가하다가 소멸되는 양상은 Sohn 등⁽⁷⁾이 복사 열손실 효과의 고려없이 큰 Le 를 갖는 연료/산화제에 대해 화염의 동적 거동을 조사한 연구 결과에서 관찰된 화염 진동 양상과 본질적으로 같으며 손과 김⁽⁸⁾이 보여준, $Le=1.0$ 인 화염에서 복사 열손실에 의해 나타나는 화염 진동 양상과도 본질적으로 같다. 본 연구에서는 실제 화염과 유동 상황에서 소멸 조건 근처 화염은, 섭동된 화염조건이 정상상태 소멸 조건에 도달하지 않았더라도 과도한 열손실에 의해 야기되는 고유 불안정, 즉 맥동 불안정에 의해 소멸될 수 있음을 명확히 보여주었다. 이전의 일단계 반응으로 계산된 화염 진동 거동은 화학적에너지와 열에너지간의 변환 과정을 지나치게 단순화하여 비현실적인 반면에, 상세화학반응을 고려한 본 계산에서는 화염의 동적 거동이 현실적으로 묘사

되었다.

화염 거동과 관련한 양상 I과 II 를 구분하는 경계선의 모양은, 이전의 연구⁽⁸⁾에서 구한 경계선 모양과 유사하지만 무한순환해는 존재하지 않았다. 동일 유동 조건에서 다단계 화학반응을 고려하면 일단계 화학반응을 고려한 경우보다 화염이 더 불안정하게 된다. 따라서 이전의 연구에서 제시된 '무한순환해 존재 영역'은 상세화학반응을 고려한 본 계산에서는 '진동하다가 소멸되는 영역'에 포함된다.

진동 지속 시간은 초기 조건과 섭동 조건에 따라 $O(0.1\sim 10\text{ s})$ 로 상당히 넓은 영역에 걸쳐 있음을 알 수 있었다. 교란이 존재하는 실제 상황에서 안정적인 화염이 존재하는 영역은 기존의 정적 소멸 조건과는 다르며, 이는 난류 유동장에서 형성된 층류 화염소의 동적 소멸조건으로 사용될 수 있다. 상세 화학반응을 고려한 계산은, 실질적이고 정량적인 화염 거동 자료와 더불어 이러한 동적 소멸 조건에 대한 정량적 자료를 제공한다.

4. 결 론

대항류 유동장에 형성된 메탄/공기 확산화염에서 상세화학반응을 고려한 수치해석을 통해 복사 열손실에 의한 맥동 불안정을 조사하였다.

정상상태해로부터 복사 열손실이 존재하는 경우 닫힌 폐곡선 형태의 정상상태 화염구조를 얻었으며 스트레인율이 작은 영역에서는 복사 열손실로 인한 소멸이 발생하였다. 초기 정상상태해에 교란이 주어진 경우, 여러 형태의 양상을 보이는 동적 화염 거동을 관찰할 수 있었다. 화염의 동적 거동 양상은 초기 정상상태 화염 조건과 교란의 크기에 의존하였다. 정적 소멸 조건 근처로부터 충분히 떨어진 화염은 진동하다가 새로운 정상상태 해로 수렴되었으며, 분기점과 정적 소멸 조건 사이의 정상상태 화염은 미소 교란에 의해서도 진동하다가 소멸되었다. 실제 연료와 상세화학반응을 이용한 본 계산은 화염의 동적 거동을 현실적으로 묘사하였고, 확산 화염에서 맥동 불안정이 발생하며 실험⁽⁶⁾에서 관찰된 화염 진동 현상의 원인은 복사 열손실에 의해 기인하는 맥동 불안정임을 좀더 현실적으로 뒷받침하였다. 또한, 본 계산을 통해 교란이 존재하는 실제

화염에서의 정량적인 동적 오염 조건을 얻을 수 있었다.

좀 더 현실적인 불안정 현상 모사를 위해서는 상세화학반응을 고려한 해석과 더불어 다차원 해석을 수행해야 할 것이며, 이 경우 훨씬 더 복잡한 양상의 불안정 현상이 나타날 것이다. 이와 같은 다차원 효과를 고려한 해석은 향후의 연구에서 고려될 것이다.

후 기

본 연구에서 정석호는 서울대학교 정밀기계설계연구소의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

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 Osslations 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) 손채훈, 김중수, 1999, "복사 열손실로 인한 확산 화염의 맥동 불안정에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제9호, pp. 1185~1191.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Ju, Y., Guo, H., Maruta, K., and Liu, F., 1997, "On the extinction Limit and Flammability Limit of Non-adiabatic Stretched Methane-Air Premixed Flames," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 342, pp. 315~334.
- (12) Tien, C. L., 1968, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 253~324.
- (13) Kee, R. J., Grear, 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) 손채훈, 1998, "확산화염의 음향파 응답 특성과 맥동 불안정에 관한 연구", 공학박사 학위논문, 서울대학교.
- (16) Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y., and Niioka, T., 1998, "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity," *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 181~187.