

에혼합화염의 불안정성 및 비선형적 거동에 관한 수치적 연구

강상훈* · 백승욱** · 임홍근***

Numerical Study on the Premixed Flame Instability and Nonlinear Behavior

Sang Hun Kang, Seung Wook Baek and Hong G. Im

ABSTRACT

To understand fundamental characteristics of combustion in a small scale device, the effects of the momentum and heat loss on the stability of laminar premixed flames in a narrow channel are investigated by two-dimensional high-fidelity numerical simulation. A general finding is that momentum loss promotes the Saffman-Taylor (S-T) instability which is additive to the Darrieus-Landau (D-L) instabilities, while the heat loss effects result in an enhancement of the diffusive-thermal (D-T) instability. These effects are also valid in nonlinear behavior of the premixed flame. The simulations of multiple cell interactions are also conducted with heat and momentum loss effects.

Key Words : Premixed flame, Instability, Small scale device

기 호 설 명

F	교란의 진폭	w	교란의 증가율
H	열손실 변수	λ	교란 파장길이
k	교란 파수 (wavenumber)	τ_{zx}, τ_{xz}	점성력(viscous stress)
Pe	Peclet number	δ_{th}	화염두께
x_f	화염면의 교란	τ_{th}	화염시간 ($= \delta_{th}/S_L$)

1. 서 론

최근 들어 반도체 산업을 비롯한 많은 분야에서 초소형시스템들이 적용되면서 이들 시스템으로 안정적이고 효율적인 동력을 공급하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 대부분의 초소형 시스템들은 전기에너지를 주동력원으로 삼고 있으며 이동식 시스템의 경우에는 전기 배터

리를 이용한 동력시스템에 의존도가 매우 높다고 할 수 있다. 그러나 전기 배터리의 경우에는 에너지 밀도가 타 에너지원보다 현저하게 떨어질 뿐만 아니라 장시간 충전을 필요로 하는 경우가 많아 이를 대체할 수 있는 동력장치의 개발이 필요한 실정이다. 많은 연구자들은 전기 배터리의 대체 동력원으로서 화학에너지를 손꼽고 있다. 특히 초소형연소시스템(Micro combustion system)을 이용한 구동장치는 화학적 에너지를 전기에너지의 중간단계 없이 기계적 에너지로 전환할 수 있어 그 효율 면에서 여타 다른 동력장치보다 우수하다고 할 수 있다.

초소형연소시스템의 개발에 있어서 가장 중요

* 한국항공우주연구원, 항공추진그룹

† aeroksh@kari.re.kr

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

*** Dept. of Mech. Eng., Univ. of Mich., USA

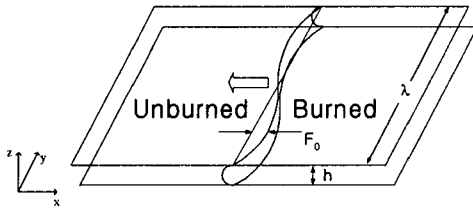


Fig. 1 Schematic of the flame propagation through the Hele-Shaw cell

한 일은 연소시스템 내부에서 화염을 안정화하고 제어하는 일이다. 좁은 공간에서 화염을 존속시키기 위해서는 화염두께가 얇은 예혼합화염이 유리하지만 조건에 따라 연소불안정성에 의하여 화염이 불안정해 질 수 있기 때문에 이를 적절하게 제어해야하는 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 많은 연구자들이 예혼합화염의 연소불안정성에 관하여 연구해 왔다. 예혼합화염은 내재적 불안정성을 통하여 층류에서 난류로 스스로 천이된다. 이 중 Darrieus-Landau (D-L) 불안정성과 diffusive-thermal (D-T) 불안정성은 이러한 내재적 불안정성의 대표적인 모드라고 할 수 있으며 수십년 동안 많은 연구자들에 의해 연구되었다[1-4]. 그러나 초소형 연소시스템과 같이 협소한 공간에서 예혼합화염이 전파될 때에는 벽면으로부터 마찰에 의한 운동량 손실 및 열손실을 무시할 수 없게 되므로 기존의 연소불안정성의 특성이 영향을 받을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 좁은 채널 내에서 예혼합화염이 전파될 때 운동량 손실 및 열손실 효과가 전체적인 연소불안정성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보고, 초소형 연소시스템 개발의 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 수치해석기법

화염면의 두께 및 화염전파속도는 예혼합화염의 불안정성 및 거동과 밀접하게 연관되어있는 변수이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 변수들의 변화를 정확하게 예측하기 위해서 고해상도의 수치해석기법(Direct Numerical Simulation)을 이용하였다. 이러한 방법은 계산 영역의 크기에는 한계가 있으나 별다른 가정없이 선형영역의 화염거동 뿐만 아니라 비선형 영역의 거동까지 해석할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 기본적으로 고찰하고자 하는 현상은 평행한 두 평판사이로 정의될 수 있는 Hele-Shaw cell을 통한 예혼합화염의 전파이다(Fig. 1). 이 현상을 보다 편리하게 고찰하기 위하여 본 연구에서는 갈릴레안 변환 (Galilean

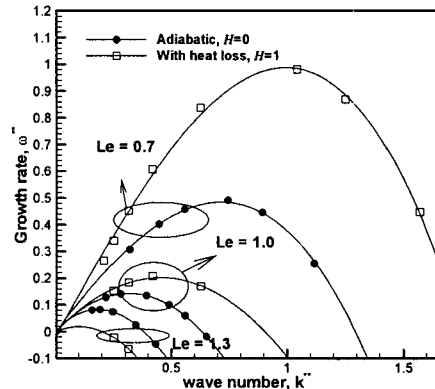


Fig. 2 Growth rate versus the wave number for different Lewis number and heat loss conditions: $h^{**} = 8$, $F_0/\lambda = 10^{-3}$

Transformation)을 통하여 화염면을 따라 이동하는 관찰자의 입장에서 현상을 해석하였다. 즉, 화염면을 계산영역내에 오랫동안 머무를 수 있게 하기 위해, 평판과 유동은 일정한 속도로 화염전파방향과 반대방향으로 이동하게 된다. 또한 Hele-Shaw cell을 통한 화염의 전파현상을 2차원적으로 모사하기 위해서 cell 두께방향의 속도장과 온도장은 다음과 같이 포물선 분포(parabolic profile)를 갖는다고 가정하였다.

$$u(x, y, z) = -\frac{4\{u(x, y, h/2) - U_c\}}{h^2}z^2 + \frac{4\{u(x, y, h/2) - U_c\}}{h}z + U_c \quad (1)$$

$$T(x, y, z) = -\frac{4\{T(x, y, h/2) - T_w\}}{h^2}z^2 + \frac{4\{T(x, y, h/2) - T_w\}}{h}z + T_w \quad (2)$$

이때 h 는 Hele-Shaw cell의 두께를 나타내며 U_c 와 T_w 는 관찰자의 이동에 의한 대류속도(Convective velocity)와 Hele-Shaw cell 벽면의 온도를 각각 나타낸다. 벽면온도 T_w 는 화염의 열손실과 밀접한 관련이 있으며 벽면의 재질 및 외부온도에 따라 달라질 수 있으므로 다음과 같은 열손실 변수 H 를 도입하여 정의한다.

$$T_w = T_0 + (1 - H) \times (T_g - T_0) \quad (3)$$

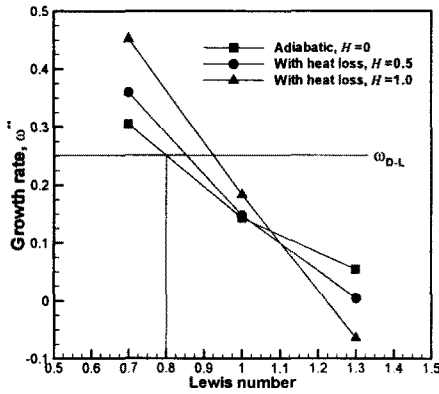


Fig. 3 The growth rate as a function of the Lewis number and heat loss parameter : $h^{**} = 8$, $\lambda^{**} = 20$, $F_0/\lambda = 10^{-3}$

이때 T_0 는 반응물 초기 온도를 나타내며 T_g 는 그 지점에서의 기체온도를 나타낸다. $H=0$ 인 경우에는 $T_w = T_g$ 가 되어 단열벽면조건을 얻을 수 있고 $H=1$ 인 경우에는 $T_w = T_0$ 가 되어 등온벽면조건을 설정할 수 있다.

이러한 온도장 및 유동장의 가정을 포함하여 압축성 Navier-Stokes 방정식과 에너지, 화학종 방정식을 단단계 단종 아래니우스 모델과 함께 해석하였다. 지배방정식은 6차정확도를 갖는 외재적 유한차분법[5]을 이용하여 차분하였으며, 3차정확도의 외재적 Runge-Kutta방법[6]을 통하여 시간진행에 따른 해를 구하였다. 경계조건으로는 화염전파방향에 대해서 무반사 경계조건[7, 8]을 주었으며 화염전파의 가로방향의 경계면은 주기경계조건(Periodic boundary condition)을 주어 현상을 해석하였다. 평면화염의 초기조건은 1차원 계산을 통해 안정화된 결과를 2차원으로 mapping하여 구성하였으며 다음과 같이 사인함수 형태의 작은 교란(perturbation)을 첨가하였다.

$$x_f = F_0 \sin(ky) \quad (4)$$

이 때, x_f 는 화염면에 첨가된 교란을 나타내며, F 는 교란의 진폭, $k(=2\pi/\lambda)$ 는 교란의 파수(wavenumber)를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 기본적으로 $Re_a = 1700$, $Pr = 0.7$, $\sigma = 0.8$, $\beta = 10$ 을 기준값으로 사용하였다. 또한 수평방향의 계산 영역은 화염두께의 50배 정도를 유지하였으며 열역학적 화염두께에 10개의 격자점을 할당하여 충분한 해상도를 갖도록 하였다.

3. 결과

3.1 선형영역에서의 불안정성

Diffusive-thermal (D-T)불안정성의 기본적인 메커니즘은 화염면으로의 질량확산과 열확산의 불균형 현상이다. 따라서 Lewis 수가 중요한 변수가 되며 열손실 효과 또한 D-T 불안정성에 중요한 영향을 끼칠 것으로 예상할 수 있다. 이 절에서는 열손실 효과가 D-T 불안정성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수치해석적 실험(Numerical experiment)을 수행하였다. Fig. 2에는 Lewis 수의 변화 및 열손실효과의 유무에 따라 연소불안정성의 크기가 어떻게 달라지는지 나타냈다. 이 때 w 는 연소불안정성에 의한 교란크기 F 의 증가율로 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$w = \frac{1}{F} \frac{dF}{dt} \quad (5)$$

그림에서 살펴볼 수 있듯이 열손실 효과는 Lewis수에 따라 다르게 나타났다. 즉, $Le=0.7$, 1.0 인 경우에는 열손실효과를 고려한 경우 교란 증가율이 단열조건인 경우보다 더 크게 나타나 화염이 더 불안정해졌으나 $Le=1.3$ 인 경우에는 열손실 효과가 교란증가율을 감소시켜 화염을 더 안정화시키는 결과를 보였다. 이를 더 자세히 살펴보기 위해서 Fig. 3에는 일정한 교란과수($k^{**} = 0.314$ or $\lambda^{**} = 20$)에 대한 교란 증가율의 변화를 발췌하여 도시하였다. 기존의 이론과 동일하게 Lewis 수가 감소함에 따라 화염이 더 불안정해지는 현상은 열손실 여부에 관계없이 동일하게 나타났으나 열손실 효과가 불안정성에 미치는 영향은 Lewis 수에 따라 다르게 나타났다. 즉, D-T 모드에 의해 불안정한 영역($Le < 1$)에서는 열손실효과가 불안정성을 더 심화시키지만 D-T 모드에 의해 안정한 영역($Le > 1$)에서는 열손실효과가 불안정성을 감소시키는 역할을 했다. 이는 다시 말하면, 열손실 효과가 Lewis 수에 따른 교란증가율의 변화기울기를 증가시켰다고 할 수 있다. 이러한 현상의 원인에 관한 간단한 물리적 설명은 아직까지 이루어지지 않고 있다. 그러나 Bechtold 등[9]은 최근의 점근해석(Asymptotic Analysis)을 통한 연구에서 열손실 효과가 Markstein 길이의 변화를 초래하여 본 연구에서 제시한 결과와 동일한 경향이 나타나게 된다는 것을 수식적으로 증명하였다.

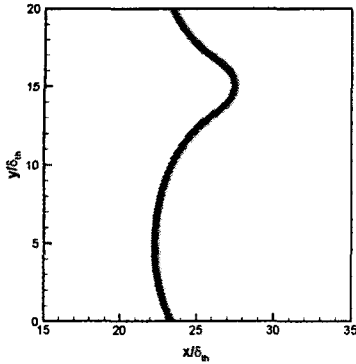


Fig. 4 Normalized reaction rate contours in nonlinear behavior at $t^* = 4000$, without heat and momentum loss, for $Le = 1.0$, $\lambda^{**} = 20$, $F_0/\lambda = 10^{-2}$

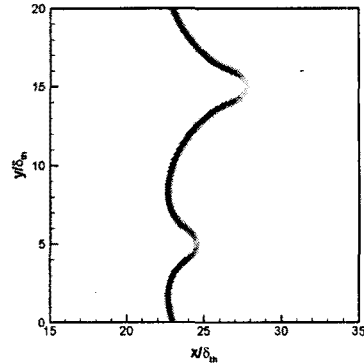


Fig. 5 Normalized reaction rate contours in nonlinear behavior at $t^* = 4000$, without heat and momentum loss, for $Le = 0.7$, $\lambda^{**} = 20$, $F_0/\lambda = 10^{-2}$

3.2 비선형영역에서의 불안정성

3.1 에서는 열손실효과가 D-T 모드를 더 심화시키는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 결과는 교란의 정도가 매우 작은 경우로 정의될 수 있는 선형적 거동영역에 국한된 결과였다. 따라서 이러한 영향이 일반적인 화염의 비선형적 거동영역에서도 유효한 것인지는 확실하지 않다. 따라서 본 절에서는 열손실 효과를 포함한 예혼합화염의 비선형적 거동에 대해서 살펴보기로 한다.

예혼합화염에 있어서 비선형적인 거동과 선형적인 거동의 중요한 차이점은 D-T 모드에 의해 발생하는 화염면의 곡률에 따른 국부적인 화염속도의 변화이다. Markstein[10]의 이론에 의하면 실제 화염속도 u_n 은 층류 평면 화염속도 u_L 로 부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$u_n = u_L [1 - (L_M/R)] \tag{6}$$

이때 L_M 은 Markstein 길이를 나타내고 R 은 화염면의 곡률반경을 나타낸다. 이러한 국부적인 화염속도의 변화는 선형영역의 경우 곡률반경이 매우 크므로 무시할 수 있지만, 비선형영역의 경우 전체적인 화염면의 거동에 중요한 역할을 하게 된다. Yuan 등[11]은 이러한 영향으로 인해 화염면의 셀 분리가 일어날 수 있음을 지적한 바 있다. Fig. 4과 5에는 Lewis 수가 1.0과 0.7인 경우에 화염면의 거동을 반응물 분포도를 이용하여 도시하였다. 이 때 열 및 운동량손실은 고려하지 않았다. 그림을 살펴보면 Lewis 수가 1.0인 경우

(Fig. 4) 1개의 화염면 셀이 생성되며 화염면의 위치에 따른 반응물의 변화는 심하지 않은 것을 관찰할 수 있다. 그러나 Lewis 수가 0.7인 경우 (Fig. 5)에는 국부적인 반응물의 차이로 인하여 셀 분리가 발생하여 2개의 셀이 생성되었음을 알 수 있다.

셀 분리의 메커니즘은 다음과 같이 설명할 수 있다. 초기조건으로 주어진 미소교란은 불안정성에 의해서 점점 커지게 되고 화염면은 골짜기부분(Trough)과 봉우리 부분(Crest)으로 나뉘어져 화염면 셀이 생성된다. 골짜기부분이 후방으로 후퇴하게 되면 셀의 경계면 부분의 곡률반경이 감소하게 되므로 Eq. (6)에 의해서 국부적인 화염속도가 증가하게 된다. 셀 경계면은 세로방향으로 전파되므로 화염면의 봉우리 부분은 점차 늘어지고 평평해져 화염강도는 점점 약화되게 된다. 시간이 지나면서 화염면의 봉우리 부분은 점차 약화되어 마침내 분리된다. Fig. 4와 5에 나타난 결과의 비교에서 D-T 모드에 의해 불안정한 화염은 국부적 화염속도의 변화로 인하여 셀 분리를 일으키는 것을 알 수 있다. Fig. 6에는 $Le = 1.0$ 이고 열손실을 고려한 경우에 화염면의 거동을 도시하였다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이, Lewis 수가 1.0임에도 불구하고 셀 분리가 발생해 2개의 셀이 생성되었음을 알 수 있다. 이는 선형영역에서의 경향과 마찬가지로 열손실 효과가 D-T모드의 효과를 증진시켜 셀분리를 일으킨 것으로 설명할 수 있다.

열손실 효과가 선형영역에서 뿐만 아니라 비선형영역에서도 D-T 모드의 효과를 증진시키는 것이 확인되었으므로 이러한 효과는 Lewis 수가 작은 경우에 더욱 현저하게 나타날 것으로 기대

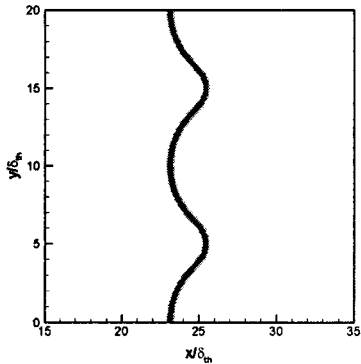


Fig. 6 Normalized reaction rate contours in nonlinear behavior at $t^* = 4000$, with heat loss only, for $Le = 1.0$, $\lambda^{**} = 20$, $F_0/\lambda = 10^{-2}$

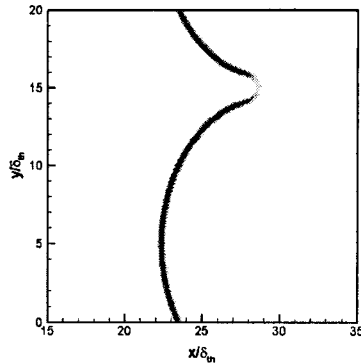


Fig. 8 Normalized reaction rate contours in nonlinear behavior at $t^* = 4000$, with momentum loss only, for $Le = 0.7$, $\lambda^{**} = 20$, $F_0/\lambda = 10^{-2}$

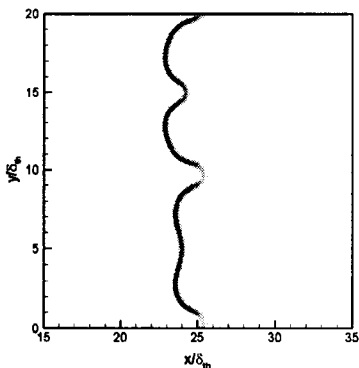


Fig. 7 Normalized reaction rate contours in nonlinear behavior at $t^* = 900$, with heat loss only, for $Le = 0.7$, $\lambda^{**} = 20$, $F_0/\lambda = 10^{-2}$

할 수 있다. Fig. 7에는 $Le = 0.7$ 이고 열손실을 고려한 경우에 화염면의 거동을 나타냈다. 그림에서 확인할 수 있듯이 이 경우에는 화염면 상의 국부적 화염속도 차이가 커지고 셀 분리현상이 매우 심화되어 다수의 셀이 생성되었음을 알 수 있다.

열손실효과를 배제하고 운동량 손실효과만을 고려하였을 경우의 화염의 거동은 Fig. 8에 도시하였다. 이 때 $Le = 0.7$ 로 두어 Fig. 5 및 7의 결과와 비교하여 분석하였다. Fig. 5, 7 및 8의 결과는 모두 $Le = 0.7$ 를 조건으로 하고있지만 그 결과는 현저하게 다르게 나타났다. Fig. 8의 경우에는 S-T 모드 효과에 의해서 연소가스 영역의 점성저항력이 강해지므로 유동이 화염면의

골짜기 부분에 집중되게 된다. 따라서 화염면의 봉우리 부분에는 상대적으로 유동이 분산되어 셀 분리 경향이 감소하였으며 결과적으로 1개의 셀만이 형성되었다.

4. 결론

지금까지 초소형 연소시스템 개발의 기초자료를 제시하기 위하여 열손실 및 운동량 손실효과가 좁은 공간을 전파해나가는 예혼합화염의 불안정성에 어떠한 영향을 미치는지 고해상도의 수치해석 기법을 통하여 수치실험을 수행하였다.

열손실 항은 포물선 두께 방향으로 포물선 형태의 온도분포를 가정하여 고려하였다. 전체적인 수치해석 결과에서 운동량 손실은 유체역학적 불안정성(D-L 모드)을 증진시키는 효과를 보였으나 열손실은 D-T 불안정성을 증진시키는 효과를 나타냈다. 예혼합화염의 선형적 거동영역에서는 열손실 효과가 Lewis 수에 따른 교란증가율의 변화기울기를 증가시켰다. 다시 말하면 D-T 모드에 의해 불안정한 영역 ($Le < 1$)에서는 열손실효과가 불안정성을 더 심화시키지만 D-T 모드에 의해 안정한 영역 ($Le > 1$)에서는 열손실효과가 불안정성을 감소시키는 역할을 했다. 또한 열손실은 임계 Lewis 수를 증가시키는 효과도 나타냈다.

예혼합화염의 비선형적 거동영역에서는 $Le = 0.7, 1.0$ 의 경우에서 D-T 불안정성 모드가 강할수록 셀 분리현상이 심화되어 복잡한 화염거동형태를 보였다. 이때 열손실 효과는 이러한 D-T 모드를 더욱 활성화시켜 셀 분할을 더 심화시키

는 경향을 보였지만 운동량 손실은 D-L 불안정성 모드를 향상시켜 이러한 셀 분할을 억제하고 셀 통합을 촉진시키는 특성을 보였다.

참고문헌

- [1] Clavin P., "Dynamic behavior of premixed flame fronts in laminar and turbulent flows," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol.11, 1985, pp.1~59
- [2] Frankel M. L. and Sivashinsky G. I., "The effect of viscosity on hydrodynamic stability of a plane flame front," *Combust. Sci. Technol.* Vol.29, 1982, pp.207~224
- [3] Cambray P. and Joulin G., "Length-scales of wrinkled of weakly-forced, unstable premixed flames," *Combust. Sci. Technol.* Vol.97, 1994, pp.405~428
- [4] Bychkov V. V. and Liberman M. A., "Dynamics and stability of premixed flames," *Physics Report* Vol. 325, 2000, pp. 115~237
- [5] Kennedy C. A. and Carpenter M. H., "Several new numerical methods for compressible shear-layer simulations," *Appl. Numer. Math.*, Vol.14, 1994, pp. 397~433
- [6] Wray A. A., "Minimal storage time advancement schemes for spectral methods," NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035
- [7] Kim J. W. and Lee D. J., "Generalized characteristic boundary conditions for computational aeroacoustics," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 11, 2000, pp. 2040-2049
- [8] Poinso T. J. and Lele S. K., "Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows," *J. Comp. Phys.*, Vol. 101, 1992, pp. 104~129
- [9] Bechtold J. K., Cui C. and Matalon M., "The role of radiative losses in self-extinguishing and self-wrinkling flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol.30, 2004, in press
- [10] Markstein G. H., "Experimental and theoretical studies of flame-front stability," *J. Aerospace Sci.*, Vol. 18, 1951, pp. 199~209
- [11] Yuan J., Ju Y. and Law C. K., "A computational simulation of the dynamics of cell evolution in flame propagation," *Proc. of The 3rd Joint Meeting of the US Sections of Combust. Inst.*, Chicago, 2003, pp. 1221-1228