

< 논문 >

비정상 대향류 확산 화염의 소화 한계 확장에 대한 실험적 연구

이은도* · 이기호** · 오광철* · 이의주*** · 신현동†
(2004년 11월 22일 접수, 2005년 2월 2일 심사완료)

An Experimental Study on the Extinction Limit Extension of Unsteady Counterflow Diffusion Flames

Uen Do Lee, Ki Ho Lee, Kwang Chul Oh, Eui Ju Lee and Hyun Dong Shin

Key Words : Unsteady Extinction Limit(비정상 소화 한계), Equivalent Strain Rate(등가 변형률), Convective-Diffusive Zone(대류-확산 영역), Diffusive-Reactive Zone(확산-반응 영역)

Abstract

In this study, extinction limit extension of unsteady (CH₄+N₂)/air diffusion flames was investigated experimentally. A spatially locked flame in an opposing jet burner was perturbed by linear velocity variation, and time-dependent flame luminosity, transient maximum flame temperature and OH radical were measured over time with the high speed camera, Rayleigh scattering method and OH laser-induced fluorescence, respectively. Unsteady flames survive at strain rates that are much higher than the extinction limit of steady flames, and unsteady extinction limits extend as the slope of the strain rate increases or the initial strain rate decreases. We verified the validity of the equivalent strain rate concept by comparing the course of unsteady extinction process and steady extinction process, and it was found that the equivalent strain rate concept represents well the unsteady effect of a convective-diffusive zone. To investigate the reason of the unsteady extinction limit extension, we subtracted the time lag of the convective-diffusive zone by using the equivalent strain concept. Then the modified unsteady extinction limits become smaller than the original unsteady extinction limits, however, the modified unsteady extinction limits are still larger than the steady extinction limits. These results suggest that there exist the unsteady behavior of a diffusive-reactive zone near the extinction limit due to the chemical non-equilibrium states associated with unsteady flames.

기호설명

a : 변형률

a_0 : 초기 변형률

$a_{equivalent}$: 등가 변형률

V : 축 방향 노즐 출구 유속

ρ : 유체의 밀도

L : 노즐 사이 거리

R : Rayleigh 산란 신호

σ_{Ri} : Rayleigh scattering cross section

x_i : i 번째 화학종의 몰분률

1. 서론

자연계에서 살펴볼 수 있는 대부분의 연소는 난류 연소를 동반하며 많은 실용 연소기에서 이를 이용하고 있다. 그동안 난류 연소의 해석을 위한 많은 노력이 있어왔지만 복잡한 난류 유동과 화염 사이의 상호 작용에 대한 해석의 어려움 때문에 난류 연소는 여전히 명확히 풀리지 않은 문제이며

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 현대자동차연구소

*** 한국건설기술연구원

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail: hdshin@kaist.ac.kr

TEL: (042)869-8821 FAX: (042)869-8200

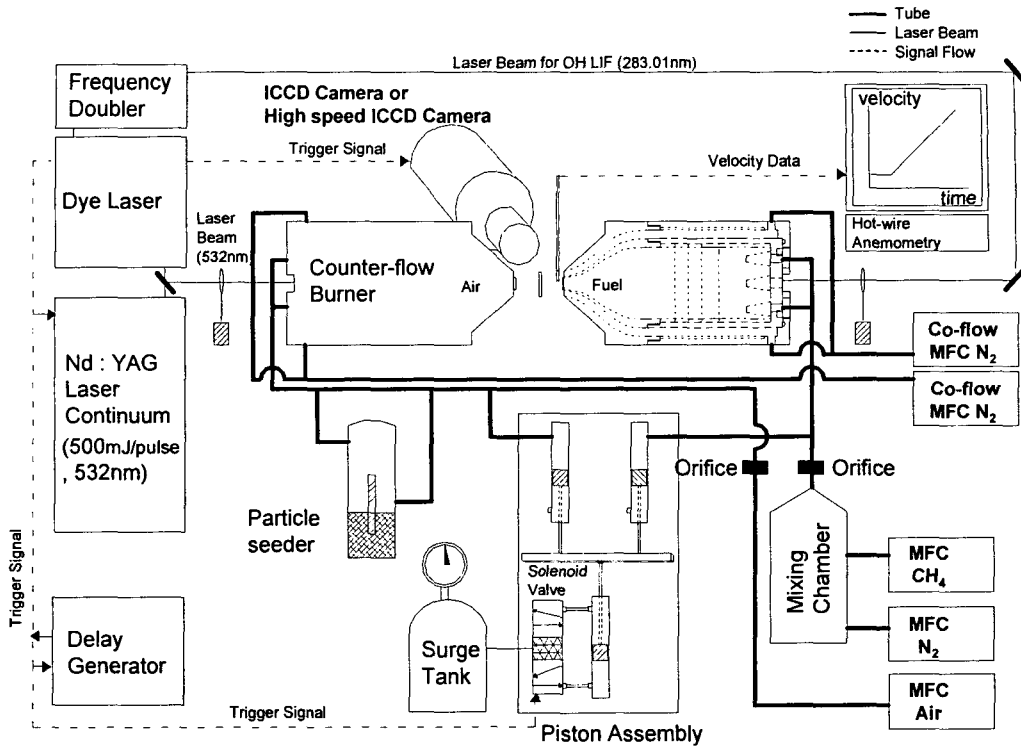


Fig. 1 Schematic of experimental setup

정확한 난류 연소 모델링은 연소 연구의 가장 중요한 목표중의 하나이다.⁽¹⁾ 일반적으로 난류 강도와 화염 상태에 따라 다양한 형태의 난류 화염이 존재한다. 특히 화염편 영역(flamelet regime)에서 난류 화염은 비슷한 유동 조건하에 있는 층류 비정상 화염(laminar unsteady flame)의 집합으로 생각할 수 있으며 층류 비정상 화염의 특성에 대한 이해로부터 난류 화염의 올바른 모델링에 필요한 유용한 자료를 얻을 수 있다.⁽²⁻⁴⁾ 최근 층류 화염의 연소 특성을 살피기 위해서 뿐만 아니라 난류 화염 모델링에의 응용을 위해 비정상 화염의 특성에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있으며, 특히 소화 한계 근처의 화염을 대상으로 하여 화염의 비정상 거동을 이해하고자 하는 노력들이 있어왔다.^(7-12,16-23) 소화는 비정상 화염 연구에서 매우 중요한 실험 방법의 하나인데 이는 화염의 비정상 특성이 소화 한계의 변화를 통해 명확히 관찰되기 때문이다. 그 동안 다양한 형태의 화염을 대상으로 한 서로 다른 연구에서 비정상 화염의 소화 한계가 정상 화염의 소화 한계에 비하여 크다는 사실이 보고 되어왔다.^(8,11,12,16-23) 이를 설명하기 위한 많은 노력을 통해 화염의

비정상 거동에 대한 이해의 폭이 넓어졌지만 화염의 비정상 소화 한계의 확장에 대한 명확한 설명은 확립되지 못했다.

비정상 화염의 기존 연구는 크게 유동장의 특성에 따라 주기적으로 진동하고 있는 유동장에 대한 화염의 거동,⁽⁵⁻⁹⁾ 전개 체트 화염에서의 비정상 효과,⁽¹⁰⁻¹³⁾ 유동장내 발생시킨 와(vortex)와 화염의 상호작용에서 나타나는 비정상 효과⁽¹⁴⁻²²⁾ 등의 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 모두 비정상 유동장에 의한 화염의 변화를 관찰하는데 그 목적이 있지만 유동장 특성에 따라 화염 곡률(flame curvature) 효과, 차등 확산(differential diffusion) 효과, 화염의 이동(flame movement)등이 각각 다른 형태로 작용하게 된다. 그 동안 비정상 화염에 대한 많은 연구가 있어 왔지만 비정상 화염의 소화 한계 확장에 대한 대표적인 실험은 Santoro 등의 연구를 들 수 있다.⁽¹⁸⁾ 이들은 비균일 확산 효과가 적은 메탄올을 연료로 사용하여 비정상 소화 실험을 수행한 결과 매우 큰 비정상 유속 변동이 가해졌을 때 소화가 일어나는 변형률이 정상 상태에 비하여 높게 나타남을 관찰하였다. 이들은 혼합층 거동에 대한 간단한

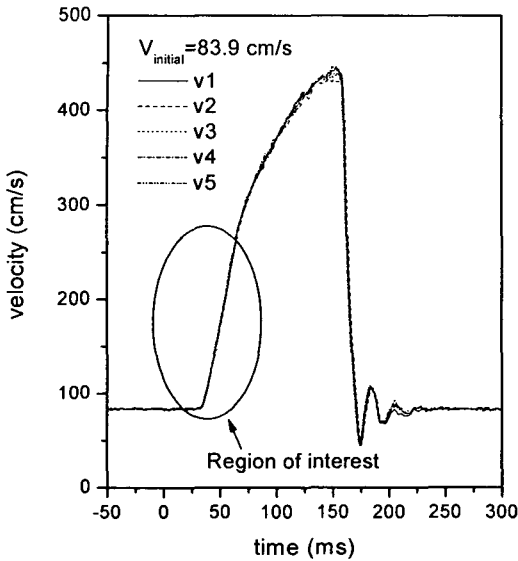


Fig. 2 Velocity change over time [results of five times repeating experiments]

해석을 토대로 등가 변형률(equivalent strain rate)을 적용하였고 이를 통해 비정상 소화 한계와 정상 소화 한계의 차이를 상당히 줄였으며 비정상 화염에서는 한 시점의 변형률 보다 변형률의 시간 역사를 고려한 등가 변형률을 이용하는 것이 화염의 제어 인자로 보다 더 옳은 의미를 가진다고 주장 하였다. Kyritsis 등은 대류를 대표하는 변형률 보다 확산을 대표하는 스칼라 소산률(scalar dissipation rate)이 더 정확한 화염 제어 인자라 생각하고, 라만(Raman) 산란을 이용하여 비정상 상태에서 소멸이 일어나는 시점의 스칼라 소산률을 측정 한 결과 비정상 화염의 소화 한계가 정상 소화 한계보다 5% ~ 26%정도 큼을 보고 하였다.⁽¹⁹⁾ 이는 변형률을 통해 소화를 살펴볼 때 소화점이 최고 두 배 이상 차이 났던 Santoro의 결과와 비교할 때 비정상 소화 한계와 정상 소화 한계의 차이가 상당히 줄어든 결과이다. 한편 Katta는 연료와 산화제 양단에서 같은 크기의 와동을 분사했을 때 발생하는 대향류 화염의 소화에 관심을 두고 수치해석을 통해 와동의 세기에 따라 화염의 소화 한계가 달라짐을 보고하였다.⁽²⁰⁾ 이들은 다양한 지점의 변형률과 스칼라 소산률을 통해 소화 한계를 살펴보았는데 변형률과 스칼라 소산률 모두에서 유속 변동이 더 급격해 짐에 따라 소화 한계가 확장되었으며 각 경우 최고 스칼라 소산률로 소화를 관찰할 때 정상 소화 한계와 비정상 소화 한계 사이의 차이가 가장 작음을 보고 하였다. 또한 소화

한계의 변화에 확산-반응 영역(diffusive-reactive zone)에서의 비정상 효과가 영향을 줄 수 있음을 언급하였다. 이와 같이 화염의 비정상 거동을 살펴보기 위한 다양한 접근들이 있어왔지만 아직도 비정상 화염의 소화 한계 확장에 대한 명확한 설명이 없는 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 비정상 효과 이외의 다른 효과들을 최소화한 실험조건에서 다양한 유속 변동과 초기 조건에 따른 대향류 확산 화염의 비정상 소화 과정을 통해 비정상 화염의 거동 특성을 관찰 하였다. 특히 정상 소화과정과 비정상 소화 과정을 상호 비교하여 등가 변형률의 타당성에 대해 평가해 보고 이를 통해 확산-반응 영역의 비정상 효과에 대해 알아보도록 하겠다. 본 연구 결과를 통해 유속 변동에 의해 영향 받는 확산 화염구조의 변화를 면밀히 관찰 할 수 있으며 비정상 화염의 소화 한계 확장의 원인을 보다 명확히 밝힐 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험 방법

Fig. 1은 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 연소기와 피스톤 부, 레이저 및 동기 시스템으로 이루어진 측정 부등 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 연소기는 대향 제트 버너(opposing jet burner)로 중심 노즐의 내경은 14mm이고 주위류 노즐의 내경은 20mm이다. 왼쪽에 공기를 오른쪽에 희석된 순수 메탄을 공급하였고 산화제 노즐과 연료 노즐 사이의 거리는 14mm로 하고 질량 유량계를 사용하여 유량을 조절하였다. 피스톤 부는 화염에 유속변동을 주기 위해 설치 되었으며 연료와 산화제를 저장했다가 분출하는 두 개의 상단 피스톤과 이들을 구동하기 위한 하단의 공압 피스톤으로 구성되어 있다. 유속 변동의 크기는 상단 피스톤의 직경에 의해 결정되게 되는데, 상단 피스톤의 직경을 $D_{piston} = 20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}$ 로 바꾸어가며 서로 다른 유속 변동을 가하였다. 시간에 따라 변화하는 화염 온도와 OH 라디칼의 농도를 측정하기 위하여 Rayleigh 산란 기법(Rayleigh scattering method)과 OH LIF 방법이 사용되었다.^(23,28-30) Rayleigh 산란 기법은 Nd:YAG 레이저(Continuum, 500mJ, 532nm)를 광원으로 사용하고 대역 통과 필터(band pass filter, 532nm, FWHM 10nm)를 장착한 ICCD (Princeton Inc. 512x512)로 신호를 측정하였다. OH LIF는 Nd:YAG 레이저와 더불어 다이(dye) 레이저 및 파장 분할기(frequency doubler)를 이용하여 283.01nm로 동조된 레이저를 광원으로 사용 하였고, $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi^+(v'=1, v''=0)$ 전이 Q₁₆ 라인의 OH LIF

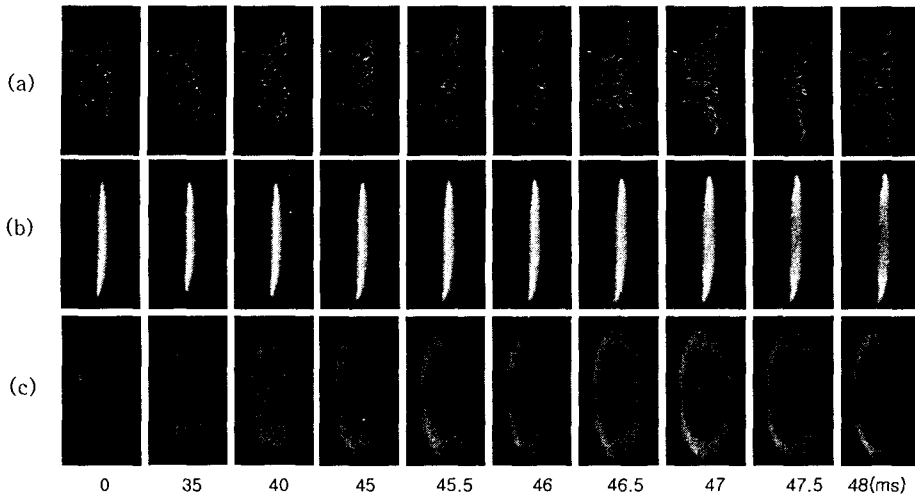


Fig. 3 Behaviors of flame during unsteady extinction process (a) visualization of flow field (b) flame images at 90 degree view (c) flame images at 45 degree view [pictured by HICCD camera, $CH_4:N_2 = 5:5$ $a_{initial} = 266.1$ (1/s)]

신호를 UG-11 과 WG-305 필터를 장착한 ICCD 카메라를 이용하여 측정하였다. 레이저 광원은 산화제와 연료 버너 후단에 장착된 석영창(quartz window) 반경 10mm, 두께 3mm)을 통해 화염으로 공급된다. 화염의 자발광을 통한 소화점은 High speed ICCD 카메라(HICCD, Phantom v7.0)를 사용하여 측정하였다. 레이저, ICCD 카메라 및 HICCD 카메라는 신호 지연 발생기(pulse delay generator, BNC 555-4C)에 의해 피스톤과 동기되어 작동하며 피스톤의 움직임을 기준으로 하여 일정기간의 지연시간을 줌으로써 시간에 따른 화염의 특성을 관찰할 수 있었다.

3. 비정상 화염의 소화 특성

3.1 피스톤에 의한 유속 변동

Fig. 2는 피스톤으로 유속 변동을 가했을 때 노즐 출구 유속을 열선 유속계를 이용하여 측정한 결과이다. 같은 조건에서 5회 반복 실험한 결과를 함께 나타낸 그래프로 유속 변동이 우수한 재현성을 보임을 확인할 수 있으며 관심 있는 영역에서 속도 변화가 선형적임을 알 수 있다. 또한 노즐 출구에서 화염대까지 위치를 변화 시켜가며 피스톤 구동 이후 노즐 출구의 유속 변동이 감지 되는데 까지 걸린 시간을 측정된 결과 노즐에서의 거리에 관계없이 33ms로 일정하게 유지됨을 확인하였다. 따라서 유동장의 변화에 지체 효과가 없고 전체 유동장을 비압축성 유동장으로 보아도 무리가 없음을 확인할 수 있었다.

3.2 비정상 소화점 측정

Fig. 3은 유속변동에 따른 화염과 유동장의 변화를 나타낸 그림으로 High speed ICCD 카메라(HICCD, Phantom v7.0)를 사용하여 측정하였다. 유동 가시화를 위해 산화제 측에 산란 입자를 넣고 버너 상단에서 평면 레이저 빔을 조사하여 유동장의 변화를 측정하였다. 노즐 출구 전체에서 유속의 변화가 일어나며 유속 변화에 의해 화염이 영향 받는 동안 화염의 모양이나 위치가 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 피스톤의 동작 신호 이후 노즐 출구에 유속변동이 일어나는데 약 33 ms가 소요되므로 화염은 33 ms 이후부터 비정상 유속 변동에 의해 영향 받기 시작하고, 40 ms 이후부터 화염 강도에 변화가 관찰된다. 시간이 지남에 따라 화염의 강도는 점점 더 약화되어 소화지점이 발생하기 시작하며, 이 소화 영역은 화염대 중심 쪽으로 점점 진행되고, 최종적으로 중심 화염의 소화가 일어난다. 본 연구에서는 중심 화염이 완전히 소화되는 지점을 비정상 화염의 최종 소화 점으로 잡았으며 그때의 유속을 소화 유속으로 정의하였다. Fig. 3의 경우 $t = 48$ ms 에서 화염의 최종 소화가 일어난다. 비정상 소화 과정을 살펴보면 화염대 중간에서 환형의 소염 영역이 생긴 후 소염 영역이 중심 방향과 바깥 방향 모두로 점점 더 커지며 결국 화염대 중심에서 소화가 발생함을 알 수 있는데 이는 화염대 주변의 국소 변형률(local strain rate)에 의한 영향이다.⁽²³⁻²⁵⁾ 화염의 비정상 소화점은 Fig. 3과 같이 화염의 자발광을 통해 구했으며 10회 이상 반복 측정하여 평균값을 사용하였다.

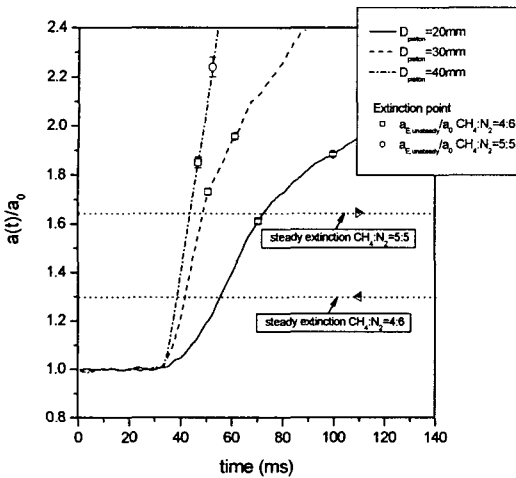


Fig. 4 Extinction limits of the flame with respect to different strain history

3.3 변형률의 기울기에 따른 비정상 소화 특성
 Fig. 4 에 서로 다른 증가율을 가지는 변형률과 화염의 소화점을 함께 도시하였다. 초기 유속을 $V_{nozzle} = 84.7 \text{ cm/s}$ 로 고정하고 유속 변동을 위한 상단 피스톤의 직경을 각각 $D_{piston} = 20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}$ 로 증가시키며 유속 변동을 측정하고 식 (1)을 이용하여 변형률을 구하였으며 초기 변형률로 정규화(normalize)하여 도시하였다.^(26,27)

$$a = -\frac{2 \cdot V_{oxidant}}{L} \left(1 + \frac{V_{fuel}}{-V_{oxidant}} \left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{oxidant}} \right)^{1/2} \right) \quad (1)$$

그림을 보면 변형률의 변화가 선형적이며 피스톤 직경이 증가함에 따라 기울기가 점점 급해짐을 알 수 있다. 정상 소화 한계는 산화제 측과 연료 측의 유량을 0.02 l/min 씩 증가시키며 최종 소화 지점을 찾고 그때 노즐 출구 속도를 측정하여 구하였다. $\text{CH}_4:\text{N}_2 = 4:6, \text{CH}_4:\text{N}_2 = 5:5$ 모두에서 비정상 소화 한계가 정상 소화 한계에 비해 훨씬 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 유속 변동의 기울기가 점점 증가함에 따라 최종 소화에 걸리는 시간은 짧아지지만 소화 한계는 증가한다. 이렇게 비정상 소화 한계가 정상 소화 한계에 비해 크게 증가한 결과는 앞서 주기적으로 진동하는 유동장 내 화염이나 화염-와동 간의 상호작용의 결과, 전개 제트 화염에서 얻은 결과와 같으며 그 경향이 일치한다.^(8,11,12)

3.4 초기 변형률에 따른 비정상 소화 특성

Fig. 5는 서로 다른 초기 변형률에 의해 안정

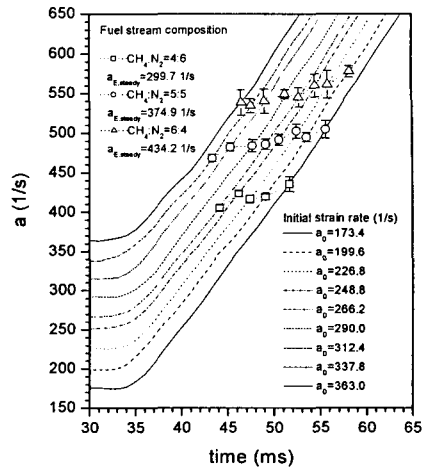


Fig. 5 Unsteady extinction limits with different initial strain rates [$D_{piston} = 40 \text{ mm}$]

화된 대향류 화염에 같은 기울기의 유속 변동을 가했을 때 화염의 거동을 알아보기 위한 실험이다 이 실험에서는 상단 피스톤의 직경을 $D_{piston} = 40 \text{ mm}$ 로 고정하여 같은 기울기의 유속 변동을 가하고 초기 변형률을 173.4 1/s에서 363 1/s까지 순차적으로 증가시킬 때 시간에 따른 변형률의 변화와 소화 변형률을 구하였다. 피스톤의 직경이 일정하므로 초기 변형률은 다르지만 변형률 변화의 기울기는 일정함을 알 수 있다. 변형률 변화의 기울기 평균은 약 $\kappa = 16400 \text{ 1/s}^2$ 이다. 화염의 소화 특성을 살펴보면, 연료 측의 메탄 양이 증가함에 따라 전체적으로 비정상 소화 변형률의 크기가 증가하고 있다. 한편 초기 변형률이 증가함에 따라 비정상 소화 변형률은 점점 감소하고 이러한 경향은 모든 연료 측의 혼합분율에 대해 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 Kistler 진동하는 유동장에서 살펴본 결과와 같은 경향을 나타낸다.⁽⁸⁾

4. 비정상 소화 한계의 확장

4.1 등가 변형률

비정상 소화 한계와 정상 소화 한계가 다른 이유는 무엇일까? 대류 영역에 지연이 없으므로 확산이 일어나는 혼합층(mixing layer) 내부의 비정상 효과가 그 원인임이 분명하다. 즉 대류-확산 영역과 확산-반응영역에서의 응답 지연이 비정상 소화 한계의 확장을 일으킨 원인으로 생각할 수 있다. 먼저 대류-확산 영역의 비정상 효과를 평가하기 위해 등가 변형률 개념을 적용

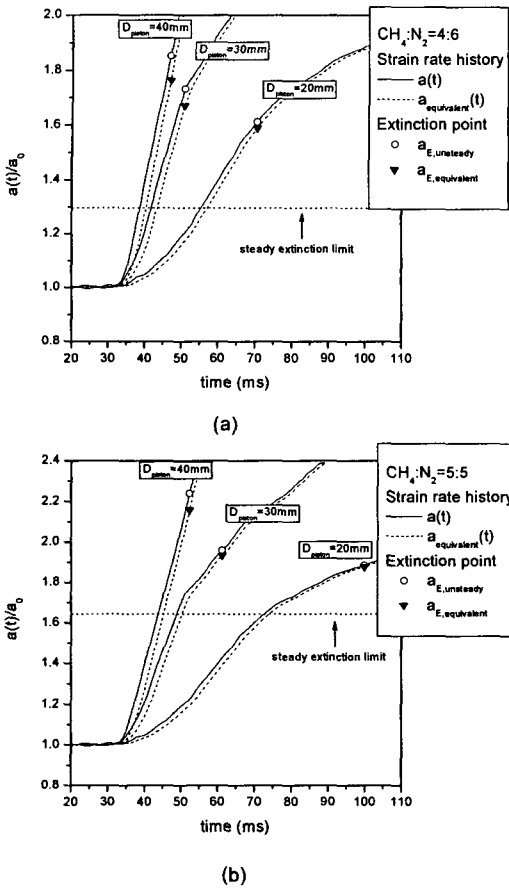


Fig. 6 Changes of the unsteady extinction points by subtracting the time lag of a convective-diffusive zone with the aid of equivalent strain rate [$a_{initial} = 226.8$ 1/s]

하였다.⁽¹⁸⁾ 등가 변형률은 변형률이 매우 빠르게 증가할 때 혼합층 내 분자 확산이 이러한 변형률의 변화를 미처 따라가지 못해 발생하는 현상으로 대류-확산 영역(convective-diffusive zone)에서의 비정상 효과를 고려한 개념이다.⁽³¹⁻³³⁾ 확산 화염에서는 확산이 화염의 반응에 직접적인 연관이 있으므로 대류-확산 영역에 시간 지체가 있는 경우 대류 영역의 정보로 화염을 규정하면 실제 화염과는 다른 조건에서 화염을 규정하게 된다. 등가 변형률 ($a_{equivalent}$)은 초기 변형률 [a_0]과 시간에 따라 변화하는 순간 변형률 [$a(t)$]을 알면 아래 식 (2)와 같이 구할 수 있다.⁽¹⁸⁾

$$\frac{a_0}{a_{equivalent}} = \frac{2a_0 \int_0^t \exp\left[\int_0^t 2a(t') dt'\right] dt + 1}{\exp\left[2 \int_0^t a(t') dt'\right]} \quad (2)$$

등가 변형률에는 대류-확산 영역에서 발생할 수 있는 시간 지연 효과가 고려되어 있으므로 확산 현상을 대표하는 인자로 생각할 수 있으며 이는 분자 확산의 공간적인 구배로부터 얻어지는 스칼라 소산률과 동일한 물리적 의미를 갖는다. 실제 변형률과 등가 변형률의 차이가 클수록 대류-확산 영역에서의 지연 효과가 더 커짐을 의미한다. 본 연구에 쓰인 선형적인 유속 변동의 경우 변형률 증가의 기울기가 급해질수록 대류-확산 영역에서의 지연 효과가 더 커지며 이러한 지연 효과는 유속 변동 초기에 가장 크고 시간이 지남에 따라 줄어들게 된다. 즉 대류 영역의 갑작스런 변화에 대한 확산 영역의 응답은 대류 영역 변화의 증가율과 관련 있으며 변화 초기에 그 영향이 가장 큼을 알 수 있다.

4.2 등가 변형률의 적용

Fig. 6은 앞서 Fig. 4의 서로 다른 유속 변동에서의 비정상 소화 한계 결과와 대류-확산 영역의 지연 효과를 고려한 소화 한계 결과를 함께 도시한 그림이다. 실선은 실제 변형률의 증가를 나타내며 점선은 각 시각에서의 등가 변형률을 식 (2)를 통해 구한 값이다. 유속 변동의 기울기가 증가할수록 실제 변형률과 등가 변형률을 차이가 더 커짐을 확인할 수 있다. 한편 등가 변형률을 이용해 수정된 등가 소화 변형률은 실제 소화 변형률 보다 작아지며 유속 변동의 기울기가 클수록 그 감소량이 커진다. 이렇게 등가 변형률을 이용하여 대류-확산 영역의 비정상 효과를 빼주면 비정상 소화 한계와 정상 소화 한계 사이의 차이가 줄어들을 수 있다. 그러나 등가 소화 변형률도 여전히 정상 소화 변형률과 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 그렇다면 이 차이가 의미하는 바는 무엇일까? 만약 대류-확산 영역에서의 비정상 효과가 온전히 고려되었다면 그 이후 나타나는 비정상 효과는 바로 확산-반응 영역(diffusive-reactive zone)에서 기인한 것으로 생각할 수 있다. 따라서 식 (2)로 표현된 등가 변형률이 대류-확산 영역의 지연 효과를 온전히 보정할 수 있는지를 확인할 필요가 있으며 그 이후 확산-반응 영역에서 나타날 수 있는 비정상 효과에 대한 조사가 필요하게 된다.

등가 변형률의 평가를 위해서는 대류영역의 변화에 대해 확산 영역이 미처 반응하지 못한 비정상 화염과 대류영역의 변화에 대해 확산 영역이 완전히 적용한 정상 화염의 비교 과정이 필요하다. 두 과정의 비교를 위해서는 유속 변동에 의해 영향 받아 변화하는 비정상 화염의

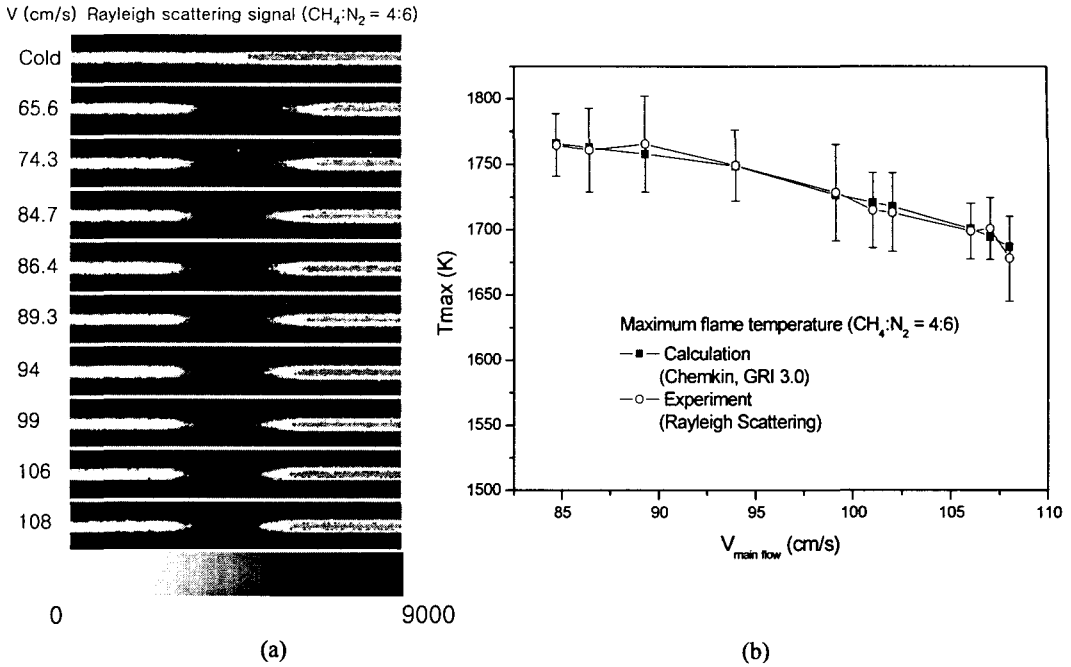


Fig. 7 Rayleigh scattering method for steady flames (a) Rayleigh scattering signals with increasing velocity (b) Maximum flame temperature with respect to velocity

소화 과정에 대한 정보와 비교하는 시점에서 비정상 화염이 겪는 변형률과 같은 크기의 변형률에 의해 영향 받는 정상 화염의 소화 과정에 대한 정보가 필요하다. 여기서 비정상 화염과 비교대상이 된다는 의미에서 정상 화염의 각각을 준 정상 상태(quasi-steady state)로 정의 할 수 있다.

4.3 Rayleigh 산란 기법을 통한 온도 측정

Fig. 7은 유속의 증가에 따른 정상 대향류 확산화염의 Rayleigh 산란 신호(scattering signal)와 이로부터 측정된 최고 온도의 변화를 나타내고 있다. Rayleigh 산란 신호는 측정 위치의 분자 밀도와 각 분자의 Rayleigh 산란 단면적(scattering cross section)에 의해 신호의 세기가 결정된다. Fig. 7(a)에서 Rayleigh 신호 강도가 매우 약한 부분이 화염이 있는 고온 영역으로 화염에 의한 온도 상승으로 인해 단위 부피당 분자의 개수가 감소하기 때문에 신호 강도가 약해진다. 그림에서 화염대 근처의 Rayleigh 신호를 살펴보면 유속 증가에 따른 고온부의 너비(thermal thickness)의 변화를 명확히 관찰 할 수 있다. 이때 화염대 근처의 신호와 상온 공기의 신호비를 구하고 여기에 각 위치의 Rayleigh 산란 단면적을 곱해주면 화염의 온도를 구할 수 있다. 각

화학종의 Rayleigh 산란 단면적은 Namer⁽²⁸⁾의 값을 사용하였고 온도를 구하는 지점에서 각 화학종의 몰분률은 수치해석^(36,37)을 통해 얻은 결과를 사용하였다. 본 연구에서는 Rayleigh 신호 분석을 위해 H₂, O₂, OH, CO, CO₂, H₂O, N₂, CH₄의 주요 화학종을 고려하였으며 이들은 메탄화염에 존재하는 화학종의 99.5% 이상을 차지한다. 각 화학종의 Rayleigh 산란 단면적과 수치해석 결과로 얻은 화학종의 분포로부터 화염이 최고 온도를 가지는 지점에서의 화학종 평균 산란 단면적(Mixture Averaged Rayleigh Scattering Cross Section)은 CH₄:N₂ = 5:5의 경우 초기 조건에서 정상 소화 조건에 이르기까지 0.42% 이내에서 변화하고 있음을 알 수 있다. 이러한 산란 단면적의 변화는 1800K를 기준으로 온도 예측에 있어 최대 8K 정도의 오차를 유발하지만 이는 실험 오차에 포함되는 값이다. 화염의 온도는 상온 공기(T=298 K)와 화염대 사이의 신호세기 비를 이용하여 구하며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{T_{flame}}{T_{air}} = \frac{(R_{sur,298K} - R_{background\ noise}) \cdot \left(\sum_i^n x_i \sigma_{Ri} \right)_{flame}}{(R_{flame} - R_{background\ noise}) \cdot \left(\sum_i^m x_i \sigma_{Ri} \right)_{air}} \quad (3)$$

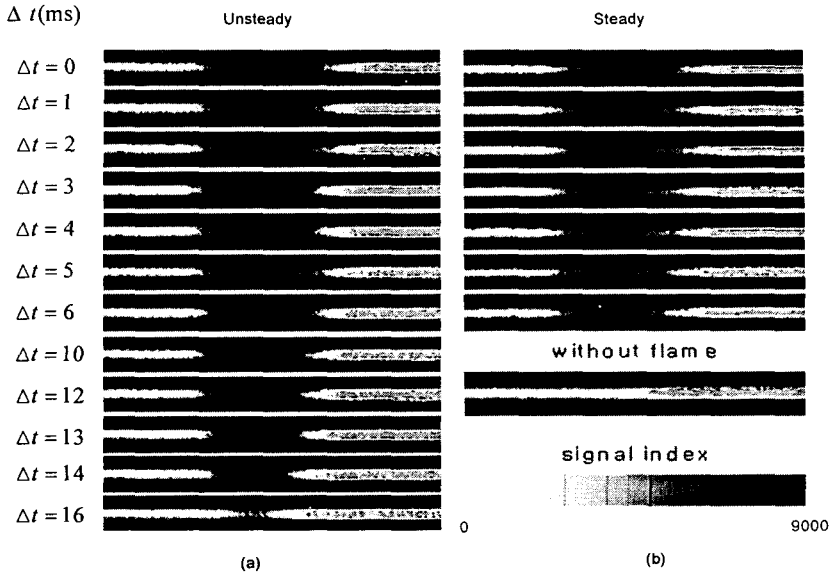


Fig. 8 Comparison between Rayleigh scattering signals of unsteady flames (a) unsteady case (b) steady case [$\text{CH}_4:\text{N}_2 = 4:6$, $a_{\text{initial}} = 226.8 \text{ l/s}$]

Fig. 7(b)에 Rayleigh 산란 신호로부터 얻은 정상 대향류 확산 화염의 최고 온도와 수치해석 결과를 함께 나타내었다. Rayleigh 산란 신호 결과는 각 조건에 대해 10 회 측정된 결과의 평균 값과 표준 편차를 함께 도시 하였다. 실험 결과 최대 표준 편차가 40K 이하로 측정의 정밀도(precision)가 매우 높으며 평균 값이 수치 해석 결과와 상당히 정확히 일치함을 알 수 있다.

4.4 등가 변형률의 평가

Fig. 8 은 비정상 소화 과정과 준 정상 소화 과정의 Rayleigh 산란 신호를 비교한 결과를 보여주고 있다. 준 정상 상태의 측정은 비정상 상태의 각 시각에 해당하는 변형률을 구하고 이 변형률을 화염에 적용시키는 방법으로 진행되었다. 여기서 Δt 는 노즐 출구에서 유속 변동이 시작되는 시점을 기준으로 한 시간이며 $\Delta t = t - 33 \text{ ms}$ 로 정의되는 시간이다. Fig. 9 에 Fig. 8 의 Rayleigh 산란 신호를 분석하여 얻은 화염 최고 온도를 변형률의 변화에 따라 도시하였다. Fig. 9(a)는 실제 변형률에 따른 화염 최고 온도의 변화이며 Fig. 9(b)는 등가 변형률로 살펴본 화염 최고 온도의 변화이다. 준 정상 상태의 경우 수치해석 결과도 함께 도시 하였다. Fig. 9(a)를 살펴보면 비정상 소화 과정과 준 정상화염이 같은 변형률에서 갖는 화염 최고온도에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 변형률에 따른 화염

최고 온도의 변화를 소화 과정의 역사(history of the extinction process)로 정의 한다면 실제 변형률을 기준으로 하면 비정상 소화 과정의 역사와 정상 소화 과정의 역사가 다른 것이다. 반면 Fig. 9(b)의 등가 변형률을 기준으로 한 소화 과정을 살펴보면 비정상 소화 과정의 역사와 정상 소화 과정의 역사가 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 등가 변형률이 유속 변동 초기에 크게 나타나는 대류-확산 영역의 시간 지체 현상을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

4.5 확산-반응 영역의 비정상 효과

지금까지 논의로 등가 변형률이 유속 변동이 있을 때 대류-확산 영역의 비정상 거동을 성공적으로 모사함을 확인하였다. 그렇다면 Fig. 6 에서 살펴본 등가 소화 변형률과 정상 소화 변형률 사이의 차이는 어떻게 설명할 수 있을까? 이는 앞서 언급한 바와 같이 확산 반응 영역에서의 지연 효과로 설명할 수 있을 것이다. 즉 비정상 소화 한계와 정상 소화 한계의 차이에서 등가 변형률의 도입으로 대류-확산 영역의 비정상 효과를 제한 이후에도 남아있는 비정상 소화와 정상 소화의 차이는 확산-반응 영역의 비정상 효과에 의한 것으로 생각할 수 있다. 확산-반응 영역에서의 비정상 효과는 Fig. 9(b)를 통해서 더 자세히 살펴볼 수 있다. 그림의 x 축인 등가 변형률은 확산 영역의 변화를 대표하는 값으로

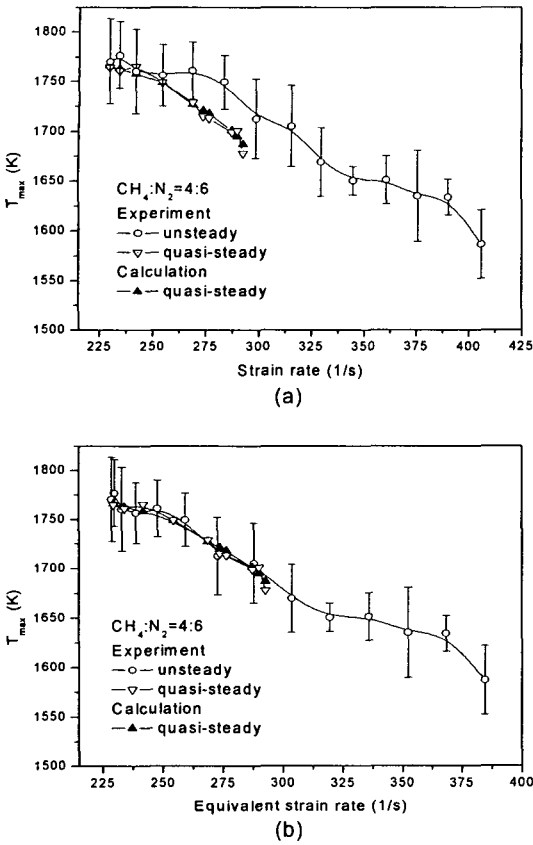


Fig. 9 T_{max} with respect to instantaneous strain rate and equivalent strain rate (a) T_{max} versus instantaneous strain rate (b) T_{max} versus equivalent strain rate [$CH_4:N_2 = 4:6$, $a_{initial} = 226.8$ 1/s]

스칼라 소산률과 같은 물리적 의미를 가진다. 만약 확산-반응 영역의 지연 효과 또는 비정상 효과가 없다면 준 정상 소화 한계를 넘어선 이후의 존재하는 화염은 어떻게 설명할 수 있을까? 확산-반응 영역의 비정상 효과를 제외한 단 하나의 가능성은 이미 소화되었지만 고온의 연소 생성물이 사라지는데 걸리는 시간이 가능성을 가진다. 그러나 소화 후 유동에 의해 고온의 연소 생성물이 사라지는데 걸리는 유동 특성 시간에 비해 훨씬 긴 시간 동안 고온이 유지되며 또한 그 온도도 상온보다 매우 높은 온도를 나타내고 있기 때문에 이 설명은 옳지 않다. 따라서 Fig. 9(b)에서 보는 것과 같이 정상 소화 한계 이상에서 존재하는 화염은 확산-반응 영역의 비정상 효과에 의한 것으로 결론 지을 수 있다.

4.6 OH LIF 측정을 통한 비정상 효과의 관찰

Fig. 10은 비정상 소화과정과 준 정상 소화 과정을 겪는 화염의 OH LIF 신호 이미지를 함께 도시한 그림이다. 실험에 사용된 레이저 광은 약 3 mJ/pulse의 에너지를 가지며 이는 여기된 OH의 소멸(quenching) 효과가 크지 않은 포화(saturated) OH LIF 실험 영역이다. 앞서 화염의 온도를 통해 살펴본 것과 마찬가지로 비정상 소화과정의 각 시간에 해당하는 변형률을 이용해 준 정상 상태의 화염을 만들고 서로 비교하였다. Fig. 11은 변형률의 변화에 따른 OH 신호 강도의 최고 값을 도시한 그림이다. Fig. 11(a)는 실제 변형률에 따른 변화이며 Fig. 11(b)는 등가 변형률에 따른 변화이다. 앞서 화염 온도를 통해 비교했을 때와 마찬가지로 실제 변형률을 기준으로 볼 때 나타나는 비정상 소화 과정과 준 정상 소화 과정 사이의 차이가 등가 변형률로 보면 크게 줄어들 수 있다. 이는 등가 변형률의 도입을 통해 대류-확산 영역의 비정상 효과가 보상되었기 때문이며 등가 변형률의 타당성을 다시 한번 검증할 수 있는 자료이다. 한편 정상 소화 한계 이상에서 OH 라디칼은 계속 존재하며 이는 확산-반응 영역의 비정상 효과를 다시 한번 증명해 주는 결과이다.

4.7 비정상 소화 한계 확장과 난류 화염

지금까지 살펴본 비정상 화염의 거동은 난류 화염의 해석과 밀접한 관련이 있다. 특히 비정상 화염의 소화 한계의 확장에 관여하는 대류-확산 영역의 비정상 효과와 확산-반응 영역의 비정상 효과는 기존 난류 화염 모델링의 개선이 필요함을 의미한다.⁽³¹⁻³⁵⁾ 대류-확산 영역의 비정상 효과가 유속변동의 초기에 중요한 반면 확산-반응 영역의 비정상 효과는 특히 소화 한계 근처에서 중요하다. 일반적인 난류 연소는 항상 국부적인 소화와 재점화를 동반하며 특히 제트 화염의 안정화 지역(stabilization region)처럼 상대적으로 큰 변형률에 의해 영향을 받는 위치에서는 소화 현상이 빈번히 일어나게 된다. 화염이 비정상 소화 과정을 겪게 되면 앞서 살펴본 바와 같이 확산-반응 영역의 비정상 효과가 나타나게 되며 정상 화염의 소화 조건 이상에서 화염이 존재하게 될 것이다. 실제 확산-반응 영역의 비정상 효과가 일어나는 경우 화염의 상태는 열-화학 적으로 비평형 상태(thermo chemically non-equilibrium state)이다. 따라서 본 연구에서처럼 열이나 반응물이 더 추가되지 않으면 결국 소화에 이를 것이 분명하다. 그러나 만약 정상 화염의 소화 조건

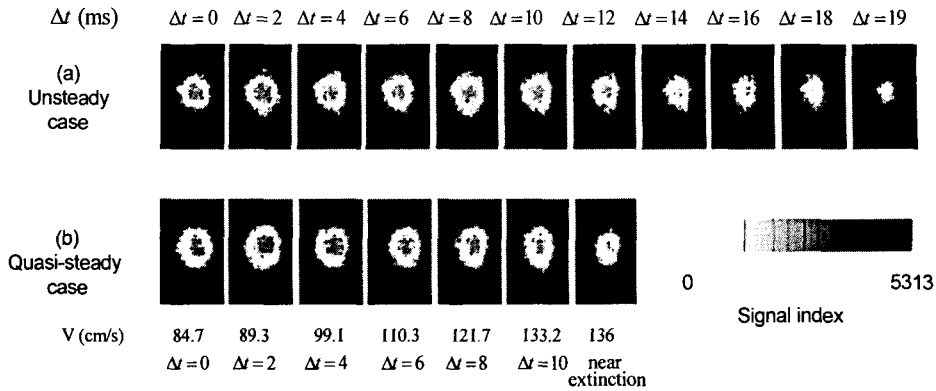


Fig. 10 Comparison between OH LIF signals of unsteady flames and those of steady flames (a) OH LIF images of unsteady extinction process (b) OH LIF images of steady flames [$\text{CH}_4:\text{N}_2 = 5:5$, $a_{\text{initial}} = 226.8$ 1/s]

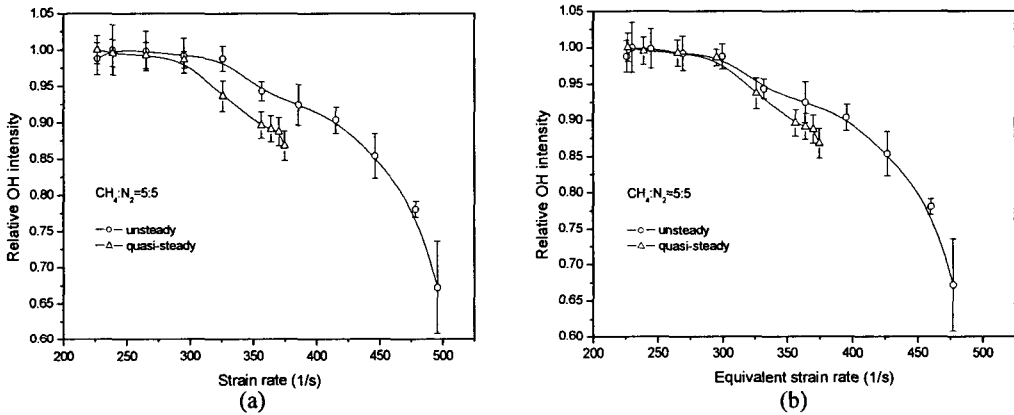


Fig. 11 Behaviors of relative OH intensity with respect to instantaneous strain rate and equivalent strain rate (a) instantaneous strain rate (b) equivalent strain rate [$\text{CH}_4:\text{N}_2 = 5:5$, $a_{\text{initial}} = 226.8$ 1/s]

이상에서 확산-반응 영역의 비정상 효과에 의해 유지되고 있는 화염에 새로운 반응물이나 열이 더 공급된다면 어떻게 될까? 확산-반응 영역의 비정상 효과에 의해 유지되는 온도가 1600K 이상이므로 분명히 재 점화 현상이 일어날 것이다. 난류 연소의 경우 난류 유동에 의한 전달현상이 매우 활발히 일어나므로 확산-반응 영역에 있는 화염에 이러한 열 및 반응물의 공급이 일어나고 재 점화가 일어나는 경우를 쉽게 그려볼 수 있다. 이와 같이 대류-확산 영역과 확산-반응 영역의 비정상 거동은 난류 화염의 연소 속도(burning velocity)가 층류 화염에 비해 매우 빠르고 층류 화염이 안정화될 수 없는 유동 조건에서도 안정화 되는 난류화염의 거동과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 이러한 비정상 화염의 특성을 난류 연소 모델링에 적용할 때 보다 개선된 연소 해석이 가능할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 유속 변동에 의해 영향 받는 대향류 확산 화염의 비정상 거동을 실험적으로 관찰하고 비정상 거동을 일으키는 원인을 밝히는데 그 목표를 두었다. 다양한 연료 조성에 대하여 화염의 초기 조건과 유속 변동의 크기를 바꾸어가며 화염의 거동을 살펴본 결과 비정상 소화 한계가 정상 소화 한계에 비해 매우 크게 나타났으며 시간에 따른 유속 변동의 기울기가 심해질수록 비정상 소화 한계가 더 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 같은 유속 변동의 기울기에 대해 초기 변형률이 커질수록 비정상 소화 한계의 확장 폭이 줄어들고 연료의 희석비가 작을수록 비정상 소화한계 확장이 커짐을 알 수 있었다. 이때 초기 변형률은 이후 살펴본 대류-확산 영역의 비정상

거동과 관련 있으며 초기 변형률이 클수록 혼합층의 두께가 줄어들어 대류-확산 영역에서의 비정상 효과가 줄어들게 되며 결과적으로 비정상 소화 한계의 확장 폭이 줄어들게 된다.

본 연구에서 관찰된 비정상 소화 한계의 확장 현상을 이해하기 위하여 확산 화염의 구조를 대류-확산 영역과 확산-반응 영역으로 나누고 각각의 비정상 효과를 살펴보았다. 먼저 대류-확산 영역의 비정상 효과를 살피기 위해 등가 변형률의 개념을 도입한 결과 비정상 소화 한계가 약간 감소 하기는 하였지만 여전히 정상 소화한계보다 크게 나타남을 관찰하였다. 이러한 차이가 확산-반응 영역의 비정상 효과에 의한 것으로 판단하고 비정상 소화 과정과 준 정상 소화 과정의 비교를 통해 등가 변형률의 타당성을 검증하였다. 비교 결과 등가 변형률이 대류-확산 영역의 비정상 효과를 성공적으로 표현하고 있음을 확인하였다. 이를 토대로 확산-반응 영역의 비정상 효과가 존재함을 증명 할 수 있었다.

이상의 결과는 화염의 비정상 거동을 주로 소화의 관점에서 관찰한 것으로 기존의 비정상 연구들에서 구별할 수 없었던 확산-반응 영역의 비정상 효과를 살펴본 연구로, 본 연구에서 얻은 비정상 화염의 거동 특성은 향후 강한 비정상 효과를 동반하는 난류 화염의 해석을 위한 난류 연소 모델링의 개선에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 과학재단 지정 우수연구 센터인 연소 기술 연구센터 (CERC)와 BK21 사업의 지원으로 수행 되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Peters, N., 2000, "Turbulent Combustion," Cambridge University Press.
- (2) Peters, N., 1984, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion," *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 10, p. 319.
- (3) Borghi, R., 1988, "Turbulent Combustion Modeling," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 14, pp. 245-292.
- (4) Williams, F. A., 2000, "Progress in Knowledge of Flamelet and Extinction," *Prog. Energy Combust. Sci.* 26, pp. 657-682.
- (5) Saitou, T. and Otsuka, Y., 1976, "Unsteady Behavior of Diffusion Flames and Premixed Flames for Counter Flow Geometry," *Combustion. Sci. and Tech.*, Vol. 12, pp. 135-146.
- (6) Egolfopoulos, F. N. and Campbell, C. S., 1996, "Unsteady Counterflowing Strained Diffusion Flames : Diffusion-Limited Frequency Response," *J. Fluid Mech.*, Vol. 318, pp. 1-29.
- (7) Egolfopoulos, F. N., 2000, "Structure and Extinction of Unsteady, Counterflowing, Strained, Non-Premixed Flames," *Int. J. Energy Res.* Vol. 24, pp. 989-1010.
- (8) Kistler, J. S., Sung, C. J., Kreutz, T. G. and Law, C. K., 1996, "Extinction of Counterflow Diffusion Flames Under Velocity Oscillations," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 113-120.
- (9) Brown, T. M., Pitz, R. W. and Sung, C. J., 1998, "Oscillatory Stretch Effects on the Structure and Extinction of Counterflow Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 703-710.
- (10) Park, J. and Shin, H. D., 1995, "Experimental Investigation of The Developing Process of An Unsteady Diffusion Flames," *Combustion and Flame* Vol. 110, p. 67.
- (11) Lee, E. J., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2000, "Experiments on the Transient Effect of Evolving Jet Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 2079-2084.
- (12) Lee, E. J. and Shin, H. D., 2003, "Extinction of an Evolving Jet Flame Under a Linearly-Varying Flow Field," *Combust. Theory Modeling*, Vol. 7, pp. 1-11.
- (13) You, Y. H., Lee, D. K. and Shin, H. D., 1998, "Visual Investigation of a Vortex Ring Interacting with a Non-premixed Flame," *Combustion Sci. and Tech.* Vol. 139, p. 365.
- (14) Rolon, J. C., Aguerre, R. and Candel, S., 1995, "Experiments on the Interaction between a Vortex and a Strained Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 100, pp. 422-429.
- (15) Katta, V. R. and Roquemore, W. M., 2000, "Response of Hydrogen-Air Oposing-Jet Diffusion Flame to Different Types of Perturbations," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 2055-2062.
- (16) Yoshida, Kenji and Tagaki, Toshimi, 1998, "Transient Local Extinction and Reignition Behavior of Diffusion Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 685-692.
- (17) Lee, J. C., Frouzakis, C. E. and Bouloushos, K., 2000, "Numerical Study of Opposed-Jet H₂/Air Diffusion Flame-Vortex Interactions," *Combust. Sci. and Tech.* Vol. 158, pp. 365-388
- (18) Santoro, V. S., Kyritsis, D. C., Linan, A. and Gomez, A., 2000, "Vortex-Induced Extinction Behavior in Methanol Gaseous Flames: A Comparison with Quasi-Steady Extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, pp. 2109-2116.
- (19) Kyritsis, D. C., Santoro, V. S. and Gomez, A., 2002, "Quantitative Scalar Dissipation Rate Measurements in Vortex-Perturbed Counterflow Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp.

- 1679~1685.
- (20) Katta, V. R., Meyer, T. R., Brown, M. S., Gord, J. R. and Roquemore, W. M., 2004, "Extinction Criterion for Unsteady, Opposing Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 137, pp. 198~221.
- (21) Oh, C. B. and Lee, C. E., 2001, "Numerical Simulation of Unsteady CH_4 / Air Jet Diffusion Flame," *Trans. of the KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1087~1096.
- (22) Oh, C. B. and Lee, C. E., 2003, "Extinction in a Counterflow Non-premixed Flame Interacting with a Vortex," *Trans. of the KSME B*, Vol. 27, No. 10, pp. 1401~1411.
- (23) Lee, U. D., Lee, K. H., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2004, "Changes of the Flame Temperature and OH Radical in the Unsteady Extinction Process," *Trans. of the KSME B*, Vol. 28, No. 12, pp. 1557~1566.
- (24) Rolon, J. C., Veynante, D., Martin, J. P. and Durst, F., 1991, "Counter Jet Stagnation Flows," *Experiments in Fluids*, Vol. 11, pp. 313~324.
- (25) Korusoy, E. and Whitelaw, J. H., 2002, "Extinction and Relight in Opposed Flames," *Experiments in Fluids*, Vol. 33, pp. 75~89.
- (26) Seshadri, K. and Williams, F. A., 1978, "Laminar Flow Between Parallel Plates with Injection of a Reactant at High Reynolds Number," *Int J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 251~253.
- (27) Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smook, M. D. and Williams, F. A., 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure, and Flow-field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute* 23, pp. 503~511.
- (28) Namer, I. and Schefer, R. W., 1985, "Error Estimates for Rayleigh Scattering Density and Temperature Measurements in Premixed Flames," *Experiments in Fluids*, Vol. 3, pp. 1~9.
- (29) Yoon, J. H. and Lee, S. J., 2000, "Temperature Field Measurement of Non-Isothermal Jet Flow Using LIF Technique," *Trans. of the KSME B*, Vol. 24, No. 10, pp. 1399~1408.
- (30) Jin, S. H., Nam, G. J., Kim, H. S., Chang, N. N., Park, S. H., Kim, U., Park, K. S., Sim, K. H. and Kim, K. S., 1996, "Planar Measurements of OH and O_2 Number Density in Premixed $\text{C}_3\text{H}_8/\text{O}_2$ Flame Using Laser Induced Predissociative Fluorescence," *Trans. of the KSME B*, Vol. 20, No. 12, pp. 4044~4052.
- (31) Haworth, D. C., Drake, M. C., Pope, S. B. and Blint, R. J., 1988, "The Importance of Time-dependent Flame Structures in Stretched Laminar Flamelet Models for Turbulent Jet Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 22, pp. 589~597.
- (32) Im, H. G., Bechtold, J. K. and Law, C. K., 1995, "Counterflow Diffusion Flames with Unsteady Strain Rates," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 106, pp. 345~361.
- (33) Darabiha, N., 1992, "Transient Behavior of Laminar Counterflow Hydrogen-Air Diffusion Flames with Complex Chemistry," *Combust. Sci. and Tech.* Vol. 86, pp. 163~181.
- (34) Cuenot, B., Egolfopoulos, F. N. and Poinot, T., 2000, "An Unsteady Laminar Flamelet Model for Non-Premixed Combustion," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 4, pp. 77~97.
- (35) Pitsch, H., Chen, M. and Peters, N., 1998, "Unsteady Flamelet Modeling of Turbulent Hydrogen-Air Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 1057~1064.
- (36) Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., Coltrin, M. E., Grcar, J. F., Meeks, E., Moffat, H. K., Lutz, A. E., Dixon-Lewis, G., Smooke, M. D., Warnatz, J., Evans, G. H., Larson, R. S., Mitchell, R. E., Petzold, L. R., Reynolds, W. C., Caracotsios, M., Stewart, W. E., Glarborg, P., Wang, C. and Adigun, O., CHEMKIN Collection, Release 3.6, Reaction Design. Inc., San Diego, CA, 2000.
- (37) Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson R. K., Song, Soonho, Gardiner W. C. Jr., Lissianski, V. V. and Qin, Z., 2000, GRI-Mech 3.0, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.