

< 논문 >

이산화탄소로 희석된 메탄-공기 확산화염의 에지화염 불안정성

황동진* · 박 정† · 김정수* · 길상인** · 김태권***
(2006년 5월 7일 접수, 2006년 6월 29일 심사완료)

Edge Flame Instability of CH₄-Air Diffusion Flame Diluted with CO₂

Dong Jin Hwang, Jeong Park, Jeong Soo Kim, Sang In Keel and Tae Kwon Kim

Key Words: Edge Flame(에지화염), Flame Oscillation(화염진동), Lateral Heat Loss(측면열손실), Growing Mode(성장모드), Lewis Number(루이스수), Flame Instability(화염불안정성)

Abstract

Experiments in low strain rate methane-air counterflow diffusion flames diluted with CO₂ have been conducted to investigate the flame extinction behavior and edge flame oscillation in which flame length is less than the burner diameter and thus lateral conductive heat loss in addition to radiative loss could be remarkable at low global strain rates. The critical mole fraction at flame extinction is examined in terms of velocity ratio and global strain rate. It is seen that flame length is closely relevant to lateral heat loss, and this affects flame extinction and edge flame oscillation considerably. Lateral heat loss causes flame oscillation even at fuel Lewis number less than unity. Edge flame oscillations are categorized into three: a growing-, a harmonic- and a decaying-oscillation mode. Onset conditions of the edge flame oscillation and the relevant modes are examined with global strain rate and CO₂ mole fraction in fuel stream. A flame stability map based on the flame oscillation modes is also provided at low strain rate flames.

1. 서 론

Lewis 수로 대표되는 열확산과 질량확산의 불균형은 화염 불안정성(flame instability)의 원인 중 하나로 잘 알려져 왔다. 여기서 Lewis 수는 열확산에 대한 질량확산의 비로 정의 된다. 연소시스템에서 화학 반응물(chemical reaction rate)은 열에너지(thermal energy)를 발생시키기 위한 화학 에너지(chemical energy)의 공급과 연료와 산화제 즉

반응물(reactants)을 예열시키기 위한 열에너지 공급의 균형에 의해 결정된다. 일차원 예혼합 화염(premixed flame)에 대한 기존 연구를 살펴보면, Sivashinsky 등은 질량확산이 열확산보다 큰 경우 셀 불안정성(cellular instability)이 발생할 수 있음을 보였고,⁽¹⁾ 반면에 Joulin 등은 질량확산이 열확산 보다 작은 경우 진동 불안정성(oscillatory instability)이 발생할 수 있음을 예측하였다.⁽²⁾ 화염 진동(flame oscillation) 현상은 일차원 확산 화염(diffusion flame)에서도 발생되며 Kirkby 등의 일차원 평면 화염에 대한 수치 해석적 연구가 그 시발점이었다.⁽³⁾ 진동 불안정성은 화염 소화조건 부근에서 큰 Lewis 수와 열손실에 기인하며,⁽⁴⁾ 상당한 체적 열손실(volumetric heat loss)이 진동 불안정성을 일으킬 수 있는 임계 Lewis 수를 감소

† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부
E-mail : jeongpark@sunchon.ac.kr

TEL : (061)750-3533 FAX : (061)750-3530

* 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부

** 회원, 한국기계연구원 청정환경기계연구센터

*** 회원, 계명대학교 기계자동차공학부

시킨다는 사실 또한 보고되었다.^(5,6) Cheatham 등은 큰 Lewis 수 혹은 복사 열손실(radiative heat loss)에 기인하는 화염 소화 조건에서의 액적 화염 불안정성에 대해 해석하였고,⁽⁷⁾ Kim 등은 일차원 확산 화염에서 작은 Lewis 수에 의한 소염 띠(quenching stripe)의 선형 안정성에 대해 분석하였다.⁽⁸⁾ 보다 확장된 연구로써 Kim은 확산 화염의 물질-열 확산 불안정성(diffusional-thermal instability)에 대한 일반화된 이론을 발전시켰다. 그 결과 Lewis 수가 1 보다 상당히 작은 화염의 경우 셀 불안정성이 예측되었으며, 1 보다 상당히 큰 경우 맥동 불안정성(pulsating instability)이 예측되었다.⁽⁹⁾

부분 예혼합 화염(partially premixed flame) 혹은 에지 화염(edge flame)은 예혼합 화염과 비예혼합 화염의 중간 영역이라고 할 수 있다. 예혼합 화염이나 비예혼합 화염으로 고려되어질 수 없는 상당수의 실용 연소 조건이 존재하며, 에지 화염은 최근 연소 분야의 뜨거운 이슈 중의 하나로 여겨지고 있다.⁽¹⁰⁻¹⁴⁾ 에지 화염은 화염강도가 강하고 유동장과 균형을 이루는 곳을 향해 전파하는 특성을 지니며, 전파속도에 따라 미연가스(unburned gas)로 전진하는 점화파(ignition wave or advancing edge)와 기연가스(burned gas)로 퇴각하는 실패파(failure wave or retreating edge)가 발생한다. 에지 화염의 경우 적당한 열손실은 단위 Lewis 수 조건에서도 에지 화염 진동(edge flame oscillation)을 발생시킬 수 있다고 보고되었으며,^(14,15) 연료나 산화제 측 Lewis 수가 1 보다 큰 경우 진동 불안정성이 나타나며, 또한 체적 열손실은 에지 화염의 진동 불안정성을 더욱 증진시킨다.

대향류 확산 화염 형상에서 에지 화염의 거동과 화염 불안정성에 대한 몇 가지 실험 및 수치 해석적 연구들이 보고되었지만,⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 이들 연구들은 대부분 고 신장률 영역에서의 연구 결과임을 주목하여야 한다. 최근 Park 등은 대향류 확산 화염에서 저 신장률과 고 신장률에서의 화염 소화 거동의 차이점을 실험과 2차원 DNS(Direct Numerical Simulation)을 통해 분석하고 다음과 같은 결과를 얻었다. 고 신장률에서의 화염은 화염 중심부에서 소화되기 시작하고 전체 화염에 대해 순식간에 소화 현상이 일어났으며, 저 신장률 화염 소화는 화염의 바깥부분에서 시작하여 화염의

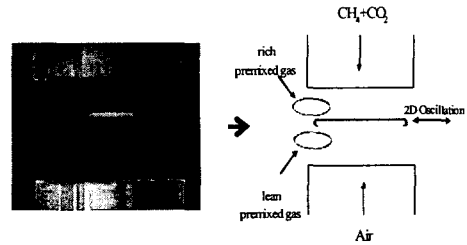


Fig. 1 Representative direct photo and schematic diagram of low strain rate counterflow diffusion flame configuration

중심부로 소화현상이 진행되며 동시에 화염길이 가 감소하였다. 또한 2차원 DNS를 통해 저 신장률 대향류 확산 화염에서 화염 소화 거동은 복사 열손실뿐만 아니라 측면 방향 열손실(lateral heat loss)과도 밀접한 관계가 있음을 입증하였고, 저 화염 신장률에서 화염길이는 측면 방향 열손실의 척도가 될 수 있음을 보고하였다.⁽¹⁹⁾

Fig. 1에서 보는 바와 같이 화염 바깥쪽 에지 부분에 형성되는 농도장은 부분 예혼합 화염구조를 갖는다. 결과적으로 저 신장률 영역의 화염 소화 조건에서 화염은 복사 열손실뿐만 아니라 반경 방향으로의 추가적인 열손실을 경험하게 되어 다양한 형태의 진동 불안정성이 관찰될 것으로 기대된다. 본 연구의 목적은 이산화탄소로 희석된 저 신장률 대향류 확산 화염에서 에지 화염 진동 불안정성의 시작조건과 진동 불안정 모드에 대해 조사 분석하는 것이며, 또한 실험적으로는 거의 관찰되지 못했던 성장 진동 모드(growing oscillation mode)에 초점이 맞춰졌다.⁽²⁰⁾ 마지막으로 에지 화염 진동 불안정 모드에 바탕을 둔 화염 안정화 선도를 전체 화염 신장률과 속도비의 변화에 따라 작성하고 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 대향류 버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 대향류 버너는 스테인리스 스틸(stainless steel)로 제작되었으며, 버너 내경은 26mm, 연료와 산화제 버너 노즐 간 간격은 15mm로 유지하였다. 부력에 의한 노즐의 과열 방지와 온도 경계조건 유지를 위해 위 버너에 물 순환 펌프를 이용한 냉각 장치를 설치하였다.

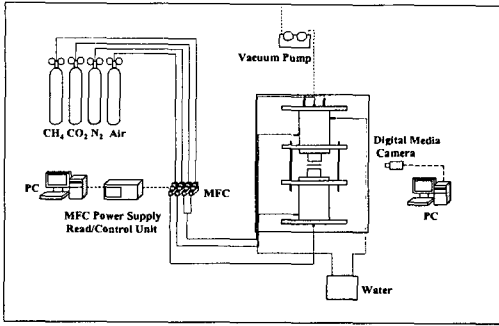


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow system

또한 연소 후 발생하는 배기가스는 위 버너에 연결된 진공 펌프를 통해 외부로 배출시켰다. 버너 덕트 내부에는 미세한 메시 스크린(mesh screen)을 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동 속도를 갖도록 하였다. 외부 화염 교란을 막고 후류(wake flow)에 의한 외측 화염을 제거하기 위해 질소(N₂)를 장막 유동(curtain flow)으로 사용하였고, 아래 버너 바깥쪽에서 체적 유량 7l/min로 전 실험 범위에서 일정하게 공급하였다.

대향류 화염에서 화염대는 일반적으로 산화제 측에 형성된다. 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료는 위 버너에서 공급하고, 산화제는 아래 버너 노즐에서 공급하였다. 연료는 99.95%의 고 순도 메탄(methane)을 사용하였으며, 고 순도의 이산화탄소를 연료 측에 희석시켰다. 희석제(diluent)로써 이산화탄소를 사용한 이유는 실험 조건에서 연료 측 Lewis 수를 1보다 작게 하기 위함이며, 특히 열용량(heat capacity) 및 복사성 흡수 계수(radiative heat coefficient)가 큰 물질로 알려진 이산화탄소를 희석시킴으로써 저 신장률 영역에서의 예지 화염 불안정성이 잘 관찰될 것으로 기대되었기 때문이다. 또한 고순도의 공기를 산화제로써 사용하였다. 각각의 가스탱크에 연결된 연료, 산화제 및 희석제는 질량유량제어기(MFC) 전원 공급 및 제어 유닛과 PC에 의해 조절되는 MFC를 통해 연료와 산화제 측에 동시에 공급하였다. 실험은 전체 화염 신장률(global strain rate)을 일정하게 유지하면서 희석제인 이산화탄소의 공급유량을 증가시키면서 실행하였고, 일련의 모든 실험과정은 유량 조절 프로그램을 통해 제어되었다. 전체 화염 신장률은 Chelliah 등이 제안한 식을 수정하여 다음과 같이 정의된다.^(21,22)

$$a = \frac{2 V_a}{L} \left[1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}} \right], \quad V_r = \frac{V_f}{V_a} \quad (1)$$

여기서 V_r 은 연료와 산화제 측 버너 덕트 출구에서의 속도비(velocity ratio)를 의미한다. V 와 ρ 는 각각 버너 덕트 출구에서의 속도와 밀도를 나타내고, L 은 버너 덕트 노즐 간 거리를, 아래첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 의미한다. 본 실험은 전체 화염 신장률은 5 s^{-1} 에서 55 s^{-1} 범위에서, 속도비는 1, 2, 그리고 3에서 수행되었다.

최근 Park 등의 연구에 의해 저 신장률 대향류 확산화염의 화염 소화 거동은 복사 열손실(radiative heat loss)뿐만 아니라,⁽²³⁾ 측면 방향 열손실(lateral conductive heat loss) 또한 중요한 인자라는 사실이 밝혀졌다.⁽¹⁹⁾ 따라서 본 연구에서는 화염 소화 거동에 있어 측면 방향 열손실 등의 다차원 효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하기 위해 실험 결과와 일차원 수치해석 결과를 비교 분석하였다. 수치 해석에 사용한 Oppdif 코드⁽²⁴⁾는 상사개념(similarity concept)에 바탕을 둔 일차원 수치 해석 기구로써 버너 간 거리의 효과는 고려하지만 버너 크기 등에 의한 다차원 효과는 예측할 수 없다. 유사변수 개념을 근간으로 둔 Oppdif 코드는 속도, 온도, 화학종의 방정식을 풀게 되고, 복사항은 광학적 박복사 모델(optically thin model)⁽²³⁾을 채택하였다. 수치 계산에 사용한 상세 화학 반응 기구는 GRI v-3.0⁽²⁵⁾이고, 열화학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN⁽²⁶⁾과 transport-based 코드⁽²⁷⁾를 사용하였다. 화염의 동적 거동은 SONY사의 디지털 미디어 카메라(digital media camera)를 이용하여 Framing rate 30 Hz, 셔터 속도(shutter speed) 1/120 sec로 실시간 촬영되었고, PC를 통해 분석되었다. 이산화탄소 희석에 따른 연료 측 Lewis 수 범위는 0.8096에서 0.8217이었고, 산화제 측 Lewis 수는 1.0643이었다.

3. 실험 결과 및 논의

본 연구의 목적은 저 신장률 대향류 확산화염에서 복사열손실뿐만 아니라 측면 방향의 열손실로 인한 화염 선단 예지 화염 불안정성에 대해 분석하는 것이다. Fig. 3은 다양한 전체 화염 신

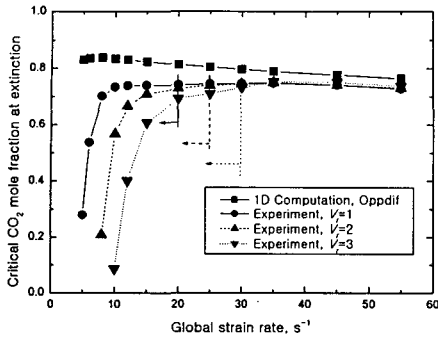


Fig. 3 Measured and computed critical CO₂ mole fractions of the fuel stream at extinction with global strain rate for various velocity ratios

장률과 속도비에 따른 화염 소화 영역에서의 임계 이산화탄소 몰분율을 나타낸 것으로써, 실험을 통해 얻은 화염 안정화 선도와 1차원 수치해석을 통해 얻은 결과를 비교한 것이다. 실험은 MFC 용량의 한계 때문에 전체 화염 신장률 55 s⁻¹까지 수행하였다. 수치해석에 사용된 1차원 Oppdif 코드는 유한한 버너 간격의 효과는 고려되지만, 유한한 버너 크기에 대한 효과는 고려되지 않는 1차원 상사개념을 바탕으로 한다. 반면 실험은 이 두 효과가 모두 포함된 결과임을 주목하여야 한다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 화염 소화 조건에서 수치해석으로부터 얻어진 임계 이산화탄소 몰분율은 전체 화염 신장률 8 s⁻¹에서 최대값을 갖는다. 전체 화염 신장률이 8 s⁻¹ 보다 작은 영역에서의 화염 소화 현상은 복사 열손실에 기인하고, 8 s⁻¹ 보다 큰 영역에서의 화염 소화 현상은 화염 신장률 때문이다. 이와 같이 고 신장률과 저 신장률 화염 사이의 화염 소화 거동이 다르다는 것은 Maruta 등의 연구에 의해 알려졌으며, 전체 화염 신장률과 화염 소화 조건에서의 임계 몰분율의 관계는 C-curve 형상을 지니고, 곡선의 변곡점은 'turning point'로 정의되었다.⁽²³⁾ 실험으로부터 얻어진 화염소화 조건에서의 임계 이산화탄소 몰분율은 전체 화염 신장률 35 s⁻¹에서 최대값을 나타낸다. 수치해석과 실험으로부터 얻어진 'turning point'가 차이가 나는 이유는 앞서 설명한 유한한 버너 크기의 효과 및 GRI v-3.0에 의한 수치해석 결과가 과다 예측되었기 때문이다. 고 신장률 영역('turning point' 보다 큰 전체 화염 신장률 영역)

에서 실험적으로 얻어진 임계 이산화탄소 몰분율은 속도비의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 갖지만, 저 신장률 영역에서는 전체 화염 신장률이 감소할수록, 그리고 속도비가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 저 신장률에서 임계 몰분율이 차이가 나는 것은 기존 연구에서 보였던 바와 같이 복사 열손실뿐만 아니라 측면 방향 열손실에 기인한다.⁽¹⁹⁾ 그 이유는 측면 방향 열손실의 척도인 반경 방향 화염길이(전체 화염 신장률이 감소할수록, 그리고 속도비가 증가할수록 감소하기 때문이다. 반경방향 화염길이(radial flame length)가 갖는 물리적 의미는 다음 식으로 설명할 수 있다.

$$q_r = k \frac{\partial T}{\partial r} \sim \frac{1}{l_f} \quad (2)$$

여기서, l_f 는 반경 방향 화염길이를 의미한다. 식 (2)에서 알 수 있듯이, 화염길이가 작아질수록 반경 방향으로의 열전달은 증가하게 된다. 따라서 화염길이가 버너 크기보다 작아지는 저 신장률 영역에서 화염은 추가적인 측면 방향 열손실을 경험하게 되며, 화염 강도가 더욱 약해짐을 알 수 있다. 반면에 고 신장률 영역에서 임계 몰분율의 차이는 전체 화염 신장률을 증가시킬수록 줄어든다. 그 이유는 전체 화염 신장률이 증가할수록 화염길이의 증가에 따른 측면 방향 열손실의 감소와 화염두께의 감소에 따른 복사 열손실의 감소 때문이다. 화염대에서의 복사 열손실은 화염대의 부피에 비례한다. 화염대의 특성길이는 $l^* = \sqrt{D^* a}$ 로 표현될 수 있으며, D^* 와 a 는 각각 특성 확산 속도와 화염 신장률을 의미한다. 화염 신장률이 작은 영역에서는 화염대의 특성길이는 커지고 복사에 의한 화염대로부터의 열손실은 커지게 되며, 화염신장률이 큰 영역에서는 화염대 특성길이의 감소로 인해 복사에 의한 열손실은 감소하게 된다. 따라서 속도비의 변화에 상관없이 고 화염 신장률 영역에서의 임계 몰분율은 큰 차이를 보이지 않는다.

Fig. 3에서 수직선들은 화염 소화 조건에서 화염 불안정성에 의한 진동 모드가 관찰되는 한계 화염 신장률을 의미한다. 수직선 좌측이 화염 불안정성이 관찰되는 영역이며, 우측 영역에서는 여타의 진동 불안정 없이 갑자기 소화되는 영역

이다. 화염 소화 조건에서의 에지화염 불안정성이 나타나는 전체 화염 신장률의 한계는 속도비를 증가시킬수록 고 화염 신장률로 영역이 확대되었다. 그 이유는 속도비를 증가시킬수록 반경 방향 화염길이가 줄어들고, 측면 방향 열손실이 증가하기 때문이다. 기존에 행해진 본 연구팀의 연구결과에 따르면, 미소 중력 하에서 행해진 버너 내경 15mm의 대항류 실험⁽¹⁹⁾과 본 논문에서는 실험결과를 제시하지 않았지만 내경 10mm 중력 하 실험에서 2차원 에지화염의 불안정성은 관찰되지 않았다. 이 조건에서 화염은 작은 버너 내경에 의해 과도한 측면 방향 열손실을 경험하게 되고 화염 소화전에 어떠한 진동 모드 없이 소화되었다. 따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 개념 하에 화염 소화 조건에서 진동 불안정성이 관찰될 수 있을 것으로 기대되는 적절한 버너 내경을 선택하여 실험을 수행하였고, 화염 소화 부근에서 몇 가지 에지 화염 진동 모드를 관찰할 수 있었다.

저 신장률에서 에지 화염 진동 모드를 확인하기 위해 비정상상태 화염의 동적 거동에 대한 이미지를 실시간 촬영하고 분석하였다. Fig. 4는 대표적인 에지화염의 진동 모드를 나타내고, 화염의 동적 거동은 디지털 미디어 카메라를 이용하여 10초 동안 촬영되었다. 에지화염의 진동 모드는 성장(growing-), 조화(harmonic-), 감쇠 진동 모드(decaying oscillation mode)로 요약할 수 있다. Fig. 4(a)와 같은 성장 진동 모드에서, 화염은 주기적으로 진동하며 그 진폭은 화염 소화 직전까지 점차 증가하였고 약 1.0 Hz의 주기를 가졌다. 특히 성장 진동 모드는 각각의 화염 소화 조건에서만 관찰되었다. Fig. 4(a)의 사진들은 전진(advancing) 또는 퇴각(retreating)하는 전형적인 에지 화염을 나타낸다. 왼쪽과 가운데 사진들에서 보이는 바와 같이 화염길이는 증가하고 전체 화염 발광 강도는 강해지는 전형적인 전진하는 에지 화염을 나타낸다. 시간이 지나면 화염의 동적 거동은 오른쪽 사진과 같은 후퇴하는 에지 화염의 형태를 지니고, 화염길이와 발광 강도는 급속히 줄어들고 화염은 소화하게 된다. Fig. 4(b)의 조화 진동 모드에서 화염은 진동 진폭의 변화 없이 주기적으로 진동하며, 약 1.0 Hz의 주기를 보였다. Fig. 4(c)에 보인 감쇠 진동 모드에서 화염은 일정기간 주기적으로 진동한 후 화염의 진동

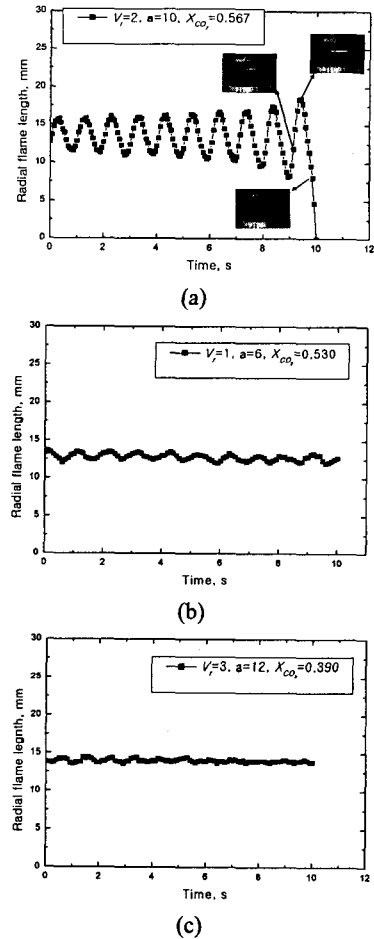


Fig. 4 Representative flame oscillation: (a) a growing oscillation mode, (b) a harmonic oscillation mode, (c) a decaying oscillation mode

폭은 서서히 줄어들고, 진동의 주기성도 사라지는 경향을 보였다. 이러한 에지 화염의 거동들은 Buckmaster 등의 기존 연구 결과와 유사한 면이 있지만, 본 실험에서 화염의 직접 가시화로는 삼지 화염 구조(triple flame structure)는 관찰되지 않았다.⁽²⁸⁾

성장 진동 모드는 앞서 설명한 바와 같이 각각의 화염 소화 조건에서만 관찰되었다. 전체 화염 신장률과 속도비에 따른 성장 진동 모드의 거동을 파악하기 위해 화염 소화 조건에서 반경 방향 화염길이의 동적 거동에 대해 분석하였다. Fig. 5에 보이는 바와 같이, 화염은 각 소화 조건에서 성장 진동 모드를 나타내고, 속도비를 증가시킬

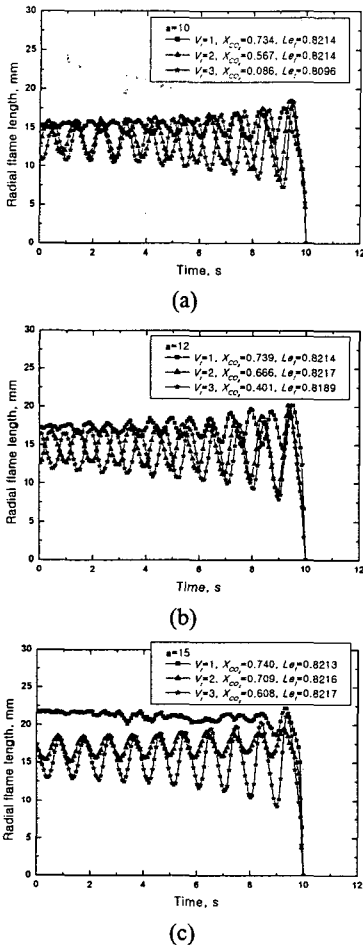


Fig. 5 Temporal variation of the radial flame length at flame extinction with velocity ratio at (a) $a=10 \text{ s}^{-1}$, (b) $a=12 \text{ s}^{-1}$ and (c) $a=15 \text{ s}^{-1}$

수축 진동의 진폭이 더욱 커짐을 확인할 수 있었다. 이산화탄소를 첨가한 본 실험에서 화염 소화 조건에서의 연료의 Lewis 수를 살펴보면 0.8096에서 0.8217의 범위였다. 이것은 이산화탄소 첨가에 따른 복사 열손실 및 반경 방향 화염길이의 감소로 인한 측면 방향 열손실 등 초과적인 과도한 열손실이 에지 화염 불안정성을 일으킬 수 있는 임계 Lewis 수를 감소시킨다는 것을 알 수 있는 대목이다. 이러한 물리적인 메카니즘은 Fig. 5에 나타난 실험 결과로부터 확인할 수 있었다. 또한 일정한 전체 화염 신장률에서 속도비를 증가시키수록 반경 방향 화염길이는 감소하고 따라서 에지 화염 진동 폭은 증가하였다. 결과적으로 화염길이는 측면 방향 열손실과 밀접한 관계

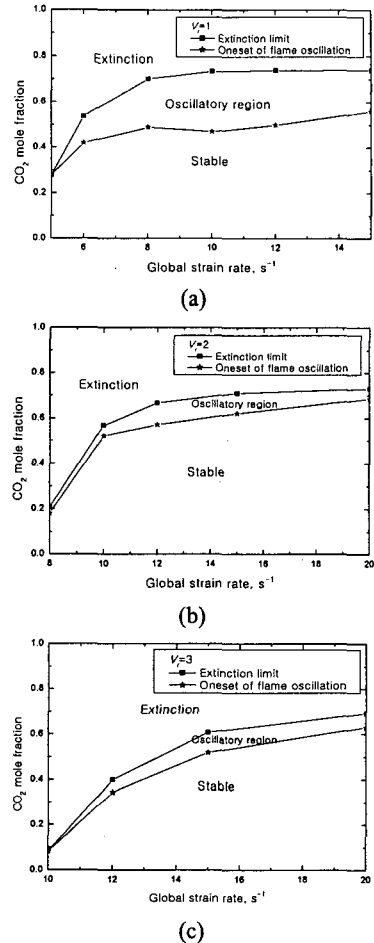


Fig. 6 Flame stability maps in CH_4/CO_2 -Air flame: (a) $V_r=1$, (b) $V_r=2$ and (c) $V_r=3$

가 있으며, 측면 방향 열손실은 저 신장률에서 화염 소화와 에지 화염 불안정성에 직접적인 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3에 보인 바와 같이 에지 화염 불안정성은 어떤 범위의 전체 화염 신장률 실험 조건에서 발생하였다. 따라서 다양한 파라미터에 대한 화염 불안정성의 시작 조건과 화염 안정화 선도에 대한 보다 엄밀한 정보가 요구되어 진다. Fig. 6은 속도비와 전체 화염 신장률 변경에 따른 CH_4/CO_2 -Air 대항류 화염에 대한 안정화 선도를 나타낸다. 모든 실험 조건에 대해 화염 불안정성이 나타나는 시작 조건에서 화염의 불안정 모드는 Fig. 4(c)에 보였던 감쇠 진동 모드를 보였다. 또한 조화 진동과 성장 진동 모드는 각각 화염이 소화되기 전과 소화 조건에서 나타났다. Fig. 6에

서 화염 불안정 영역은 전체 화염 신장률을 증가시킬수록 대체로 넓어졌다. 또한 속도비를 증가시킬수록 불안정 영역이 점차 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 5에 보인 바와 같이 예지 화염의 진동 불안정성은 화염길이의 감소에 의한 측면 방향 열손실에 의해 중대한 영향을 받는다는 것을 확인하였고, 따라서 속도비의 증가에 따라 예지 화염의 진동 불안정성은 더욱 증진됨을 보였다. 이러한 경향은 예지 화염 불안정성의 시작 조건 및 화염 불안정 영역에 대한 Fig. 6의 결과와 다소 상충된 면을 지니고 있다. 따라서 향후 연구를 통해 예지 화염 불안정성 및 화염 불안정성의 시작 조건에 대한 보다 자세한 정보를 얻기 위해 이산화탄소로 희석시킨 저 신장률 대향류 확산 화염에 대한 2차원 DNS를 수행할 예정이다.

4. 결론

CH₄/CO₂-Air 대향류 확산 화염의 화염 소화 조건에서 예지 화염의 동적 거동 및 진동 불안정성을 분석하기 위해 전체 화염 신장률, 연료 측 Lewis 수 및 속도비를 실험 변수로 채택하여 실험적 연구를 수행하였다. 반경 방향 화염길이는 측면 방향 열손실과 직접적인 연관이 있으며, 이는 화염 소화 거동과 예지 화염 불안정성에 중대한 영향을 미친다. 즉, 저 화염 신장률의 화염 소화 조건에서 속도비를 증가시킬수록 임계 이산화탄소 물분율은 감소하였다. 저 신장률 영역에서의 화염 소화 거동은 복사 열손실뿐만 아니라 식(2)를 통해 설명되는 반경 방향 화염길이의 감소로 인한 측면 방향 열손실에 기인함을 보였다. 또한 속도비의 증가에 따라 예지 화염의 진동 불안정성의 영역이 확대됨을 Fig. 3의 결과에 의해 확인하였다.

저 신장률 대향류 확산 화염에서 예지 화염 진동 불안정성은 성장(growing-), 조화(harmonic-), 감쇠 진동 모드(decaying oscillation mode)로 요약할 수 있었다. 특히 성장 진동 모드는 개개의 화염 소화 조건에서만 관찰되었으며, 속도비를 증가시킬수록 불안정 진동 폭은 더욱 증가하였다. 각 화염 소화 조건에서의 성장 진동 모드를 분석함으로써 저 화염 신장률에서 복사 열손실뿐만 아

니라 측면 방향 열손실도 중요한 인자이며 화염 소화의 직접적인 원인이라는 사실도 확인할 수 있었다. 또한 화염 신장률에 의한 소화 거동을 보이는 영역, 즉 고 신장률 영역에 대한 기존의 연구와 비교해 볼 때,⁽³⁻⁶⁾ 화염 불안정성을 일으킬 수 있는 임계 Lewis 수가 감소하였다. 이러한 결과를 통해 저 신장률 영역에서의 측면 방향 열손실의 중요성을 입증하였다. 결과적으로 저 신장률 대향류 확산 화염에서 화염 소화 거동과 진동 불안정성은 복사 열손실뿐만 아니라 측면 방향 열손실에 직접적인 영향을 받는 것으로 보여 진다.

후 기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 지방대학혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Shivashinsky, G. I., 1977, "Diffusional-Thermal Instability in Cellular Flames," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 15, pp. 137~146.
- (2) Joulin, G. and Calvin, P., 1979, "Linear Stability Analysis of Non-adiabatic Flames: Diffusional-Thermal Model," *Combust. Flame*, Vol. 35, pp. 139~153.
- (3) Kirkby, L. L. and Schmitz, R. A., 1966, "An Analytical Study of the Stability of a Laminar Diffusion Flame," *Combust. Flame*, Vol. 10, pp. 205~220.
- (4) Buckmaster, J. D., 2002, "Edge-flames," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 28, pp. 435~475.
- (5) Sohn, C. H., Chung, S. H. and Kim, J. S., 1999, "Instability-Induced Extinction of Diffusion Flames Established in the Stagnant Mixing Layer," *Combust. Flame.*, Vol. 117, pp. 404~412.
- (6) Kukuck, S. and Matalon, M., 2001, "The Onset of Oscillations in Diffusion Flames," *Combust. Theory Modelling.*, Vol. 5, pp. 217~240.
- (7) Cheatham, S. and Matalon, M., 1996, "Heat Loss

- and Lewis Number Effects on the Onset of Oscillations in Diffusion Flames," *Proc. Combust. Inst.* 26, pp. 1063~1070.
- (8) Kim, J. S., Williams, F. A. and Ronney, P. D., 1996, "Diffusional-Thermal Instability in Diffusion Flames," *J. Fluid Mech.*, Vol. 327, pp. 273~301.
- (9) Kim, J. S., 1997, "Linear Analysis of Diffusional-Thermal Instability in Diffusion Flames with Lewis Numbers Close to Unity," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 1, pp. 13~40.
- (10) Im, H. G. and Chen, J. H., 1999, "Structure and Propagation of Triple Flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures." *Combust. Flame*, Vol. 119, pp. 436~454.
- (11) Lyons, K. M., Watson, K. A., Carter, C. D. and Donbar, J. M., 2005, "On Flame Holes and Local Extinction in Lifted-Jet Diffusion Flames." *Combust. Flame*, Vol. 142, pp. 308~313.
- (12) Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 163~172.
- (13) Upatnieks, A., Driscoll, J. F., Rasmussen, C. C. and Ceccio, S. L., 2004, "Liftoff of Turbulent Jet Flames-Assessment of Edge Flame and Other Concepts Using cinema-PIV," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 259~272.
- (14) Short, M. and Liu, Y., 2004, "Edge-flame Structure and Oscillations for Unit Lewis Numbers in a Non-premixed Counterflow," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 8, pp. 425~447.
- (15) Daou, R., Daou, J. and Dold, J., 2004, "The Effect of Heat Loss on Flame Edges in a Non-premixed Counterflow Within a Thermo-diffusive Model," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 8, pp. 683~699.
- (16) Shay, M. L. and Ronney, P. D., 1998, "Nonpremixed Edge Flames in Spatially Varying Straining Flows," *Combust. Flame*, Vol. 112, pp. 171~180.
- (17) Sohn, C. H., Kim, J. S., Chung, S. H. and Maruta, K., 2000, "Nonlinear Evolution of Diffusion Flame Oscillations Triggered by Radiative Heat Loss," *Combust. Flame*, Vol. 123, pp. 95~106.
- (18) Christiansen, E. W., Tse, S. D. and Law, C. K., 2000, "A Computational Study of Oscillatory Extinction of Spherical Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 124, pp. 327~337.
- (19) Park, J., Oh, C. B., Kim, K. T., Kim, J. S. and Hamins, A., 2005, "Multi-dimensional Effects on Low Strain Rate Flame Extinction in Methane/Air Counterflow Non-premixed Flames," *Proc. ASPACC*, 5, pp. 345~348.
- (20) Buckmaster, J. D. and Zhang, Y., 1999, "A Theory of Oscillating Edge-Flames," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 3, pp. 547~565.
- (21) Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, 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," *Proc. Combust. Inst.* 23, p. 503.
- (22) Park, J., Hwang, D. J., Chung, J. O., Keel, S. I., Shim, S. H. and Lee, S. B., 2004, "Comparative Study of Flame Structures and NO_x Emission Characteristics in FIR and FGR Combustion System," *Int. J. of Energy Res.* Vol. 28, pp. 861~885.
- (23) Maruta, K., Yoshida, M., Guo, H., Ju, Y. and Niioka, T., 1998, "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity," *Combust. Flame*, Vol. 112, pp. 181~187.
- (24) Lutx, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF : A Fortran Program for Computing Opposed-flow Diffusion Flames," *Sandia Report SAND96-8243*.
- (25) Bowman, C. T., Hanson, R. K., Davidson, D. F., Gardiner, W. C., Lissianski, V., Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M. and Goldenberg, M., 1999, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- (26) Kee, R. J., Rupley, F. M., Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II", Sandia Report SAND89-8009B.
- (27) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1994, "A Fortran Code Package for the Evaluation of Gas-phase Multicomponent Transport," Sandia Report SAND86-8246.
- (28) Buckmaster, J. D., 2001, "Large-Lewis-Number Instabilities of Model Edge-Flames," *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223~2233.