

< 논문 >

저신장율 에지 화염의 진동 불안정성

김강태* · 박준성* · 박 정† · 김정수* · 오창보** · 길상인***
(2005년 11월 18일 접수, 2006년 3월 2일 심사완료)

Oscillatory Instability of Low Strain Rate Edge Flame

Kang Tae Kim, June Sung Park, Jeong Park, Jeong Soo Kim, Chang Bo Oh and Sang In Keel

Key Words : Edge Flame(에지화염), Global Strain Rate(전체화염신장율), Lateral Heat Loss(측면열손실), Lewis Number(루이스수), Oscillatory Instability(진동불안정성)

Abstract

Systematic experiments in CH₄/Air counterflow diffusion flames diluted with He have been undertaken to study the oscillatory instability in which lateral flame size was less than burner nozzle diameter and thus lateral heat loss could be remarkable at low global strain rate. The oscillatory instability arises for Lewis numbers greater than unity and occurs near extinction condition. The oscillation is the direct outcome from the advancing and retreating edge flame. The dynamic behaviors of extinction in this configuration can be classified into three modes; growing, harmonic and decaying oscillation mode near extinction. As the global strain rate decreases, the amplitude of the oscillation becomes larger. This is caused by the increase of lateral heat loss which can be confirmed by the reduction of lateral flame size. Oscillatory edge flame instabilities at low global strain rate are shown to be closely associated with not only Lewis number but also heat loss (radiation and lateral heat loss).

1. 서론

대항류 확산 화염에서 화염의 일부가 소화되면 이 지역은 부분 예혼합 상태가 된다. 소화된 지역의 경계에 나타나는 화염의 형태는 과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염, 확산 화염이 한 점(삼중점)에서 만나게 된다. 이런 화염을 통칭해서 에지화염(Edge flame)라고 한다. 삼중점은 화염 강도가 가장 강하고 유동장과 균형을 이루는 곳을 향해 전파하게 된다. 삼중점의 전파속도가 양의 값을 갖게 되면 미연가스로 전진하는 점화파(Ignition wave)가 나타난다. 반면에 삼중점의 전파

속도가 음의 값을 갖게 되면 기연가스로 퇴각하는 실패파(Failure wave)가 나타난다. 에지화염은 소화 한계 부근에서 Lewis Number(이하 Le)와 부피에 따른 열 손실, 과도한 복사 열 손실에 따라 화염 진동이 발생하게 된다.⁽¹⁻⁴⁾ Le는 열 확산에 의한 열 에너지의 변화에 대한 물질 확산에 의한 화학 에너지의 변화의 비를 나타낸다. 이때 Le의 변화에 따라 나타나는 화염 불안정성을 물질-열 확산 불안정성(Diffusive-Thermal Instability)이라고 한다. Kim은 단위 Le가 아닌 조건에서 활성화 에너지 접근법을 이용하여 화염 동적 거동의 특성을 밝힌 바 있다.⁽⁵⁾ Le가 1보다 작게 되면 셀 불안정성(Cellular instability)이 나타날 수 있고 1보다 크게 되면 맥동 불안정성(Pulsating instability)이 발생할 수 있다. 셀 불안정성을 실험적으로 Jacono에 의해서 Le와 초기 혼합 강도에 의한 셀 화염의 특성을 실험적으로 명확히 보인 바 있다.⁽⁶⁾ 또한 맥동 불안정성에 의한 화염 진동은 Cheatham과

† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계자동차공학부
E-mail : jeongpark@sunchon.ac.kr
TEL : (061)750-3533 FAX : (061)750-3530

* 순천대학교 기계자동차공학부

** 회원, 한국기계연구원 에너지기계연구센터

** 회원, 한국기계연구원 정정환경기계연구센터

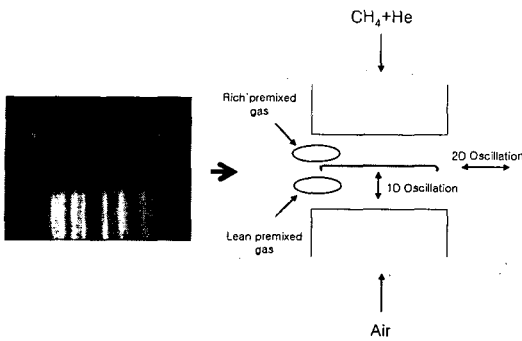


Fig. 1 Photo and schematic diagram of the counterflow flame configuration

Mtalond 에 의해 액적 확산화염에서 열손실이 없을 경우에는 매우 큰 Le 일 때 화염 진동이 나타났고 열손실이 있는 경우에는 Le 가 1 이더라도 화염 진동이 나타났으며 이때 화염 진동의 주기는 0.5~5Hz 였다.⁽⁷⁾ 확장된 연구로서 Sohn 등은 가상의 연료를 사용한 수치해석을 통해 정상상태 소염조건에 도달하기 전에 맥동 불안정성에 의해 화염이 진동하다가 결국 소멸 될 수 있음을 보였고, Le 가 1 보다 크지 않더라도 과도한 복사 열손실에 의해서 소멸 조건 근처에서 맥동 불안정성이 나타남을 보였다.^(8,9) 또한 실제 화염에서 대류 속도 증가에 의해 화염 대로 물질 전달이 증가하여 화염이 안정화 됨을 보였다. Christiansen 등은 실제 연료를 사용한 수치해석을 통해 과도한 복사 열손실에 의해 맥동 불안정성이 존재 가능하며, 화염 진동 현상과 그의 메커니즘을 구체적으로 설명한 바 있다.⁽¹⁰⁾

한편, Park 등은 저신장을 대향류확산화염에 관한 실험과 이차원 수치해석을 통하여 복사 열손실 이외에 반경 방향으로의 측면 열손실이 화염 소화에 중요한 역할을 하고, 저 신장을 화염에서 화염 소화를 위한 임계 희석제 물분을 근처에서 화염 크기는 버너 직경보다 작다는 것을 보인 바 있다.⁽¹¹⁾ 이러한 화염 구성(flame configuration)에서 외측 화염을 살펴보면 Fig. 1 에 나타낸 바 같이 혼합 구조가 전형적인 부분 예혼합 화염(partially premixed flame)을 나타내게 된다. 결과로서 Le > 1 인 경우 기존 연구들에 의해 잘 알려진 일차원 화염 진동뿐만 아니라 에지 화염(edge flame)의 이차원 화염 진동이 동시에 나타날 수 있는 화염 구성을 나타내게 된다.

기존 연구들로부터 일차원 화염 진동이 존재하는 임계 Le 가 열 손실이 존재함에 따라 감소 할 수 있음을 보고하였지만,^(4,8,9) 일차원 및 이차원 동시

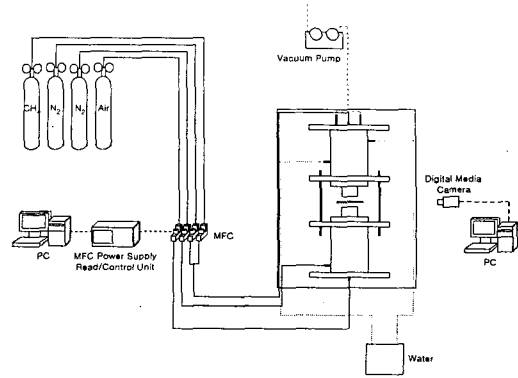


Fig. 2 Schematic diagram of counterflow burner and flow system

에 존재하는 경우에 대해서는 체계적으로 보고된 바 없다. 본 연구에서는 Park 등의 기존 연구 결과들을 기반으로 나타날 것으로 기대되는 일차원 및 이차원 화염 진동 현상을 규명하는 연구에 초점을 맞추었다.⁽¹¹⁾ 이를 통해 메탄/공기 대향류 확산 화염에 연료 측 Le > 1 이 되도록 헬륨을 메탄 측에 희석시키면서 화염 소화 거동과 일차원 및 이차원 화염 진동을 규명하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

대향류화염은 버너 노즐으로의 열손실을 최소화하고 유동장과 반응물 혼합을 쉽게 제어하고 일차원 화염 구조를 연구할 수 있다는 측면에서 광범위하게 연구되어 왔다. Fig. 2 에서 대향류 버너의 내경은 56mm 이다. 연료와 산화제의 노즐 사이의 거리는 20mm 이고 노즐을 과열 방지 및 온도 경계 조건 유지를 위하여 상부 덕트에는 물을 순환시켜 냉각하였다. 버너 덕트의 내부에는 일련의 미세 스크린을 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동 속도를 갖도록 하였다. 연료는 CH₄ 에 헬륨을 희석하여 사용하였고 산화제로는 공기를 사용하였다. He 를 희석하여 사용한 이유는 이전의 연구들⁽²⁻⁵⁾에서 밝혀진 바와 같이 대부분의 화염 진동 현상은 Le 가 1 보다 큰 조건에서 발생하며 연료 측 Le 를 1 보다 크게 만들 수 있는 가장 적합한 희석제가 헬륨이기 때문이다. 외부로부터 화염 교란을 방지하고 wake 유동에 의해 유지되는 외측 화염을 제거하기 위해 N₂ 를 장막 유동(Curtain flow)으로 사용하였고 속도는 0.3m/s 로 전 실험 범위에서 고정하였다. 각 가스실린더에서 나온 연료, 희석제 및 공기

는 질량유동제어기(MFC)를 거치며 MFC 전원 공급 및 제어 유닛과 P/C 에 의해 연료측과 산화제 측의 유량을 동시에 조절하였다.

화염의 동적 거동은 영상 증폭장치가 탑재된 고속 카메라를 이용하여 Framing rate 60Hz, 셔터 속도 1/60sec, 1024frame 으로 실시간 촬영되고 분석되었다.

화염 진동이 시작되는 조건에서 가시적으로는 화염의 진동 유무를 판단하기는 어려움이 있어 SiC-fiber 의 발광도를 측정하였다. SiC-fiber 는 화염의 끝부분에 설치하였고 Digital Media Camera 를 이용하여 Framing rate 30Hz, 셔터 속도 1/4000sec 으로 실시간 촬영되고 분석되었다.

2.2 실험 방법

화염 소화 실험은 전체 화염 신장율을 일정하게 유지한 상태에서 연료의 유동을 감소시키고 동시에 희석제의 유동을 증가시키면서 화염 소화 한계를 취득하였고 동일한 방법으로 화염 소화 한계 근처에서 실험이 수행된다. 전체 화염 신장율의 범위는 $6s^{-1}$ 에서 $30s^{-1}$ 였다.

전체 화염 신장율의 정의는 다음과 같다.^(12,13)

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + Vr \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}} \right)$$

$$\text{where } Vr = \frac{V_f}{V_a}$$

여기서 L 은 두 노즐 사이의 거리이고, V 와 ρ 는 반응물유동속도와 밀도를 나타내며, 하첨자 a 와 f 는 산화제와 연료를 나타낸다.

최근 Park 등에 의해 저 신장율 대향류 화염에서 화염의 소화는 복사 열손실 뿐만이 아니라 화염 반경 방향의 열 손실에 의한 영향이 주요하다고 밝혀진 바 있다.⁽¹¹⁾ 따라서 본 연구에서는 화염의 소화 거동에 있어서 화염 반경 방향의 열 손실을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하기 위해 1 차원 Oppdif⁽¹⁴⁾ 코드를 사용하여 수치 해석 데이터를 획득하여 실험과 비교 분석하였다. 유사변수 개념을 근간으로 둔 Oppdif 코드는 속도, 온도, 화학종의 방정식을 풀게 되고 복사항은 광학적 박복사 모델을 채택하였다. 부력항은 Oppdif 코드 상에는 첨가하지 않았고, 화학 반응 모델은 GRI-v.3.0 상세 반응 기구, 열화학적 물성치는 Chemkin, 전달 물성치는 Tranfit 을 사용하였다.

기존의 연구들에서 소화 한계 부근에서 화염 진동에 의한 불안정성이 나타난다고 수치해석적으로 밝혀졌고 이는 Lewis Number, 복사 열손실, 체적

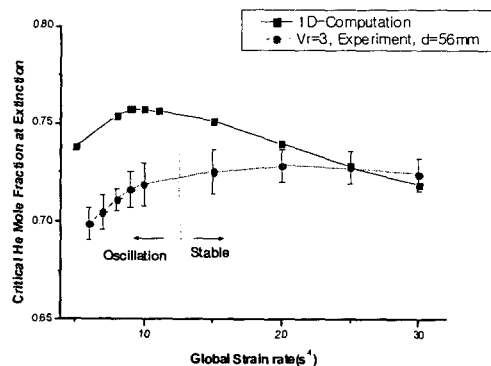


Fig. 3 Measured and computed critical nitrogen mole fraction in the fuel stream for extinction

열손실이 주요한 영향인은 잘 알려져 있다.⁽²⁻¹⁰⁾ 이러한 사실들을 근간으로 하여 소화 한계 부근에서 나타나는 화염 진동의 동적 거동과 형상을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 논의

Fig. 3 전체 화염 신장율에 따른 임계 헬륨 물분율의 소화 한계를 도시화한 것으로서, 실험으로 측정된 소화 한계 곡선과 1D Oppdif code 를 통하여 수치해석으로 얻어진 소화 한계 곡선을 비교하였다. Oppdif code 는 버너간 간격이 유한한 효과는 고려하지만 유한한 버너 직경 효과는 고려되지 않는 1 차원 상사 개념에 기반을 두고 있으나 실험은 유한한 버너 직경을 가지고 실험이 수행되었음을 주목하여야 한다. Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 수치해석으로부터 얻어진 화염소화에서 임계 He 물분율의 최대값은 화염 신장율이 $9s^{-1}$ 에서 나타난다. $9s^{-1}$ 이하에서 화염소화는 화염복사열손실에 기인하고 $9s^{-1}$ 이상에서는 화염 신장율에 의한 화염 소화 현상으로 인식된다. 반면, 실험에서 얻어진 화염 소화 임계 헬륨 물분율의 최대는 화염 신장율이 $20s^{-1}$ 에서 나타난다. 화염 신장율이 $20s^{-1}$ 이하에서 실험과 수치해석 결과가 크게 차이를 나타내는 것은 Park 등의 연구에서 지적한 바와 같이 복사 열손실 이외에도 추가적으로 측면으로 열손실 효과가 기인하는 것으로 판단된다.⁽¹¹⁾ 그러나, 화염 신장율이 증가하여 $30s^{-1}$ 가 되면 수치해석과 실험과의 차이는 현격히 줄어든다는 것을 알 수 있다. 이것은 화염 신장율 증가로 화염대 두께는

줄어들어 복사 열손실이 급격히 줄어들고 화염크기도 증가하여 측면 열손실에 의한 효과가 일차원적 화염구조를 바꾸기에 충분하지 않았기 때문이다. 실험에서 30s⁻¹ 까지만 실험이 수행된 것은 30s⁻¹ 이상에서는 MFC로 실험을 수행할 수 있는 범위를 넘어서기 때문이다. 따라서, 현재 실험 결과와 Park 등의 기존 연구들과 비교로부터 화염 신장율이 20s⁻¹을 중심으로 화염모드는 상이하게 달라짐을 확인할 수 있었다.⁽¹¹⁾ 즉, 20s⁻¹ 이상에서는 화염소화는 화염중심으로부터 시작하여 전체화염이 거의 동시에 소화된다. 반면에, 20s⁻¹ 이하에서는 외측 화염으로부터 화염소화가 시작되어 화염크기가 감소하다가 마지막으로 화염중심부가 소화되는 모드로 나타나게 된다. Park 등의 결과는 버너 직경이 미소 중력에서는 15mm 통상 중력에서는 25.4mm 였고 현재의 버너 직경은 56mm 이다.⁽¹¹⁾ 결국 측면 열손실 효과를 줄이기 위해 의도 되어진 큰 버너 직경에서도 여전히 저화염 신장율에서는 측면 열손실 효과가 존재한다는 것을 알 수 있었다. 이상으로부터 버너 직경을 56mm 까지 증가시키더라도 측면 열손실 효과는 화염소화에 중요한 역할을 한다는 사실이 주목되어야 한다. 또한 Park 등의 연구에서는 제시하지 않았지만 화염의 반경 방향으로의 화염 진동 현상이 저 화염 신장율의 소화 한계 부근에서 나타났다.⁽¹¹⁾ Park 등의 연구에서는 버너 덕트의 직경이 15mm 로 상대적으로 작기 때문에 화염의 크기가 작아서 화염의 반경 방향 열손실이 크기 때문에 화염 진동이 발생하기 보다는 빠른 소화가 발생되어 화염 진동이 확인되지 않았지만,⁽¹¹⁾ 본 실험에서는 상대적으로 버너 크기가 크기 때문에 화염 진동을 발견 할 수 있었다. 진동이 발생하는 조건은 전체 화염 신장율이 13 이하에서 화염 소화 한계 부근이었다. 또한 He 를 희석제로 사용한 혼합 조건들의 연료 측 Le 는 1.4~1.45 였다.

Fig. 4 전체 화염 신장율에 따른 입계 헬륨 물분율의 소화 한계와 이차원 화염 진동이 일어나는 영역을 나타낸 것이다. 화염의 진동 유무는 가시적으로 명확히 판단하기 어려워서 SiC fiber 의 발광도를 측정하여 판단하였다. 전체 화염 신장율이 8s⁻¹ 이하에서는 전체 화염 신장율이 감소할수록 화염 진동 현상이 일어나는 영역이 넓어진 것을 알 수 있다. 전체 화염 신장율이 8s⁻¹ 이하에서는 Fig. 3 의 왼쪽 사진에서 보는 바와 같이 화염의 크기가 매우 작은 것을 알 수 있다. 오른쪽 사진이 화염

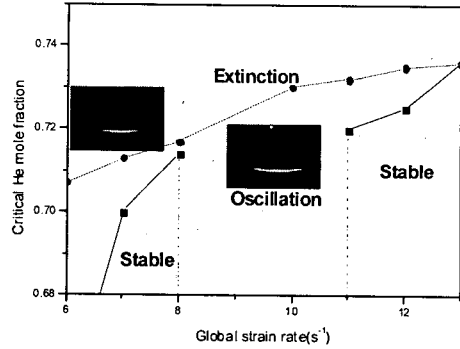


Fig. 4 Measured critical He mole fraction at extinction with identified oscillation

크기가 버너 직경과 유사한 크기인 것을 감안해서 비교해 보면 화염의 크기가 버너 노즐 보다는 현저히 작은 것을 알 수 있다. 화염의 크기가 버너 직경보다 현저히 작아 화염의 측면 열 손실이 화염 전체에 영향을 주기 때문에 순간적으로 화염의 온도와 반응율(Reaction rate)이 감소하게 된다. 이로 인하여 기연가스로 화염이 퇴각하는 실패파가 나타난다. 반응율이 감소하기에 반응물의 소비가 감소하게 된다. 시간이 지남에 따라 반응물들이 화염대 주변에 쌓이게 되어 농도가 증가하고 반응율은 증가하게 된다. 이 때에는 화염이 미연가스로 전진하는 점화파가 나타난다. 반응율이 증가하므로 화염의 온도가 증가하게 되고 주변과의 온도 차로 인하여 열손실이 증가하게 된다. 이 같은 일련의 과정이 반복되어 화염의 진동 현상이 나타나게 된다. 또한 헬륨의 물분율이 감소하더라도 화염의 크기가 충분히 커지지 않기 때문에 화염의 측면 열손실이 화염 전체에 영향을 주는 영역이 증가하였다.

전체 화염 신장율 9~10s⁻¹에서는 화염 진동 현상이 전체적으로 나타난다. Fig. 3 의 오른쪽 사진에 보인 바와 같이 크기가 버너 노즐의 크기와 비슷하다. 그리고 화염이 버너 노즐 사이에만 나타나는 것이 아니라 좌상부에도 있는 것을 볼 수 있다. 이는 화염이 상부 버너 노즐 주위의 미연가스로 전파하기 때문이다. 사진에서는 나타나지 않았지만 화염이 좌상부로부터 있는 것이 아니고 시간이 지남에 따라 상부 노즐 주위로 위치는 계속 변한다. 이러한 현상으로 인하여 화염은 진동하게 된다.

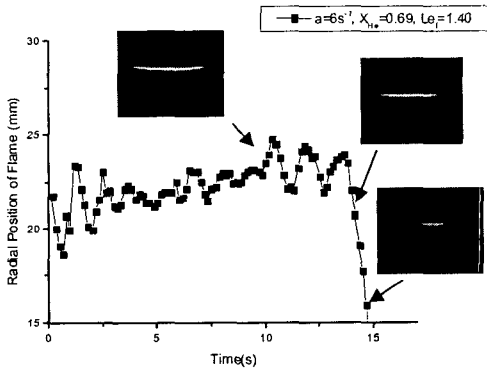
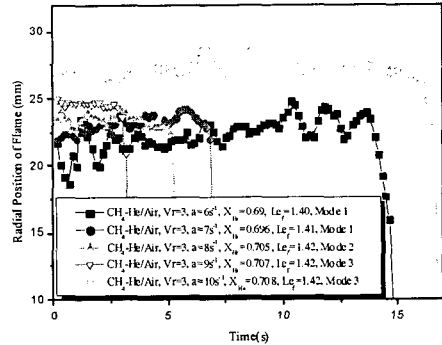


Fig. 5 Temporal variation of radial position of flame ; $a = 6s^{-1}$, $X_{He} = 0.69$, $Le_f = 1.4$

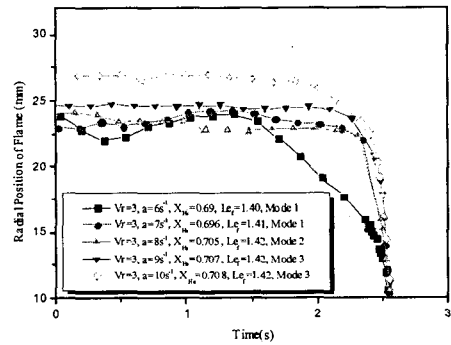
전체 화염 신장율이 $11s^{-1}$ 이상에서는 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염 진동 현상이 나타나는 지역이 감소한다. 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염의 크기가 증가하기 때문에 화염 측면 열손실이 전체 화염에 미치는 영향이 미비해지기 때문이다. 전체 화염신장율이 $13s^{-1}$ 이 초과되면 화염 진동 현상은 더 이상 나타나지 않았다.

Fig. 5 는 가장 낮은 화염 신장율, $6s^{-1}$ 에서 화염 소화 거동이 나타나기 약 15 초 전부터 소화가 발생할 때까지 화염의 동적 거동을 나타내고 사진은 대표적인 경우들을 나타낸다. 그림 좌측 상단의 사진은 화염이 반경 방향으로 전진 할 때의 (advancing wave) 사진으로서 화염의 크기가 평균적인 화염의 크기보다 커지고 화염의 발광 강도가 강해진 것을 알 수 있었다. 이는 미연 가스 쪽으로 화염이 전파해 가기 때문에 화염 강도가 증가하기 때문이다. 반면에 우측 상단의 사진을 보면 화염이 소화에 이르기 시작하는 거동을 보이는 조건으로서 상대적으로 화염이 작아졌고 화염 발광 강도가 약해진 것을 알 수 있었다. 화염이 기연 가스를 향해 후퇴하기(retreating wave) 때문에 화염 강도가 감소하기 때문이다. 우측 하단의 사진은 화염이 소화하기 직전의 화염으로써 화염의 크기가 매우 작은 상태로 화염 발광 강도도 매우 약하게 됨으로써 화염 강도가 급격히 감소 하는 것을 알 수 있었다. 이는 Buckmaster 가 제시하는 예지 화염의 거동과 동일 하지만,⁽³⁾ 본 실험에서는 화염의 직접 가시화로는 삼중화염(triple flame)은 나타나지 않았다.

Fig. 6-(a) 는 각각의 전체 화염 신장율의 화염 소화 조건에서 시간의 변화에 따른 화염 반경 방향 위치와 소화 되는 거동을 나타낸다. 화염 반경 측정용 임의의 기준 시간으로부터 측정했기 때문에 소화 지점은 모두 다르다. 그러나 화염의 크기를 살펴보면 전체 화염 신장율이 높아질수록 화



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Temporal variation of radial position of flame at various conditions, (b) Temporal variation of radial position of flame at various conditions just prior to flame extinction

염이 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 화염 측면 방향의 크기의 변화가 전체 화염 신장율이 달라짐에 따라 여러 형태로 나타난다. 즉, 전체 화염 신장율 $6\sim 7s^{-1}$ 에서는 진동 진폭의 변화가 상대적으로 크고 $0.66Hz\sim 0.1Hz$ 의 주기를 가지며, 화염의 소화 거동은 진폭이 증가하다가 소화되었다. 전체 화염 신장율 $9\sim 10s^{-1}$ 에서는 진동 진폭의 변화가 상대적으로 작고 주기는 명확하게 관찰되지 않거나 $0.66Hz$ 에서 점점 빨라지다가 진동이 나타나지 않으며, 진폭이 감소하다가 화염이 소화 되었다.

Christansen의 수치해석에서 나타난 화염의 거동과 같이 화염의 소화 거동의 진폭이 증가하다가 소화되는 경우를 Mode 1 이라고 명명하였고, 진폭이 감소하다가 소화되는 경우를 Mode 3 라고 명명하였다.⁽⁶⁾ 또한 Mode 1 과 Mode 3 사이에 천이적인 현상이 나타나는 경우를 Mode 2 라고 명명하였다. Mode 2 는 전체 화염 신장율 $8s^{-1}$ 에서는 화염의 진폭이 상대적으로 커지는 않고 화염이 소화될 때가

지 균일한 진폭의 화염 진동 현상이 계속 나타난다. 주기는 0.75~0.86Hz로 관찰되었다.

Mode 1 경우에서는 Park 등의 연구에서와 같이 낮은 전체 화염 신장율에서는 화염 크기가 버너 직경에 비해서 현저히 적다.⁽¹¹⁾ 그래서 화염 에지로부터 열 손실이 화염 전체에 영향을 미치게 된다. 즉, 열 손실이 커지면 성장 화염 진동 모드(growing flame oscillation mode)를 나타내며 소화가 발생하는 것으로 판단된다. 성장 화염 진동 모드(growing flame oscillation mode)는 Christiansen 등의 연구에서 수치해석으로는 발견 되었다.⁽¹⁰⁾ 그러나 실험으로는 관찰된 예가 문헌상에 보고된 바는 없다. Mode 2 경우에는 화염의 크기가 버너의 노즐보다는 조금 작을 때의 전체 화염 신장율로서 균일한 진폭의 진동을 보이는 조화 화염 진동 모드(Harmonic flame oscillation mode)를 나타내다 소화된다. 그러나 Mode 3 경우에는 전체 화염 신장율이 상대적으로 증가 되어서 화염의 크기가 커지게 된다. 그러므로 화염 반경 방향 열손실은 급격히 감소하여 화염 진동이 약해지는 감쇄 화염 진동 모드(decaying flame oscillation mode)로 나타난다. 따라서 Mode 3에서는 화염 진동 현상이 화염 소화 거동에 큰 영향을 주지 못했다. 이러한 동적 거동은 Fig. 6-(b)에서 보면 더 확연히 알 수 있다. 시간 기준을 소화가 발생하는 시점을 기준으로 소화 발생하기 전에 약 2.5 초 동안에 시간의 변화에 따른 화염 반경의 변화를 살펴보면 가장 낮은 전체 화염 신장율에서는 화염 반경이 가장 작고 변화가 매우 크게 나타나만 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염의 반경은 커지며 변화가 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염이 소화가 되는 시간의 기울기가 점점 커진다. 이는 화염 소화가 발생 할 때 전체 화염 신장율이 증가할수록 화염이 작아지는 속도가 더욱 빨라져서 소화가 일어나는 속도가 빨라진다는 것을 의미한다.

화염 소화가 발생할 때 나타나는 화염 진동 모드를 전체 화염 신장율에 따라 Fig. 6의 화염 안정화 선도에서 나타냈다. 전체 화염 신장율이 $7s^{-1}$ 이하에서는 화염 진동의 진폭이 점차적으로 증가하다가 소화가 발생하는 성장 화염 진동 모드(growing flame oscillation mode)가 나타난다. 전체 화염 신장율이 $8s^{-1}$ 에서는 화염 진동의 진폭이 균일하게 지속되다가 소화가 발생하는 조화 화염 진동 모드(Harmonic flame oscillation mode)가 나타난다. 전체 화염 신장율이 $9s^{-1}$ 이상에서는 화염의 진폭이 점차적으로 감소하다가 소화가 발생하는 감

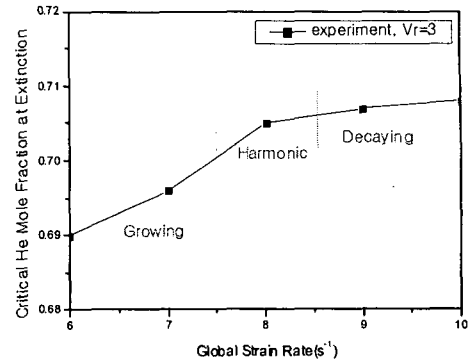


Fig. 7 Various oscillation modes at extinction with global strain rate

쇠 화염 진동(decaying flame oscillation mode)이 나타난다.

이상의 결과들로부터 저신장율의 대항류확산화염에서 화염 소화와 소화 한계 부근에서의 화염 진동에는 Le, 복사 열손실 이외에도 축면 방향 열손실이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

대항류 버너에서 C-curve의 소화 한계를 취득하기 위해 헬륨을 희석제로 사용하여 전체 화염 신장율을 $6\sim 30s^{-1}$ 까지 체계적으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 이와 더불어 다차원 열 손실 효과를 배제한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교 분석하였다. 실험으로 얻어진 화염 소화를 위한 최대 임계 헬륨 몰 분율의 전체 화염 신장율이 수치해석으로 얻어진 화염 소화를 위한 최대 임계 헬륨 몰 분율의 전체 화염 신장율보다 높게 나타났다. 저화염 신장율 화염에서는 화염 소화에 영향을 주는 요인으로 복사 열 손실 효과와 더불어 화염 반경 방향의 열 손실이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. $Le > 1$ 에 대해 수행된 실험으로부터 화염 소화 한계 부근과 낮은 화염 신장율인 경우 화염 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 화염의 진동 현상은 세 가지의 모드로 구분할 수 있다. 화염의 크기가 버너 노즐의 크기보다 현저히 작은 저화염 신장율의 경우 성장 화염 진동 모드(Growing flame oscillation mode)를 보이다 화염 소화에 이르게 된다. 화염의 크기가 버너 노즐의 크기보다 조금 작은 전체 화염 신장

을일 때 조화 화염 진동 모드(Harmonic flame oscillation mode)를 보이다 소화에 이르게 된다. 화염의 크기가 버너 노즐의 크기와 흡사하거나 조금 큰 전체 화염 신장율인 경우에는 감쇠 화염 진동 모드(decaying flame oscillation mode)를 보이다 화염 소화에 이르게 된다.

본 연구 결과와 기존 연구 결과들을 근거로 저 화염 신장율의 화염 소화 한계 근처에서 화염 진동은 Le, 복사 열손실 등의 영향뿐만 아니라 측면 열손실 효과가 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2005년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Thatcher, R. W. and Dold, J. W., 2000, "Edge of Flames That do not Exist: Flame-edge Dynamics in a Non-premixed Counterflow," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 4, pp. 435-457.
- (2) Buckmaster, J. D., 2002, "Edge-flames," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 28, pp. 435-475.
- (3) Buckmaster, J., 2001, "Large-Lewis-number Instabilities of Model Edge-flames," *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223-2233.
- (4) 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.
- (5) Kim, J. S., 1997, "Linear Analysis of the Diffusional-thermal Instability of Diffusion Flames with Lewis Number Close to Unity," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 1, pp. 13-40.
- (6) Jacono, D. L., Papas, P. and Monkewitz, P. A., 2003, "Cell Formation in Non-premixed, Axisymmetric Jet Flame Near Extinction," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 7, pp. 635-644.
- (7) Cheatham, S. and Matalon, M., 1996, "Heat Loss and Lewis Number Effects on the Onset of Oscillations in Diffusion Flames," *Twenty-sixth Symposium (international) on combustion / The combustion institute*, pp. 1063-1070.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Christiansen, E. W., Tse, S. D. and Law, C. K., 2000, "A Computational Study of Oscillatory Extinction of Spherical Diffusion Flames," *Combust. Flame*, Vol. 134, pp. 327-337.
- (11) 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," *5th Asia-Pacific Conference on Combustion*, pp. 345-348.
- (12) Chellian, 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," *Proceedings of the 23rd international Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, 503.
- (13) Park, J., Hwang D. J., Lee, K. H., Chung, J. O., Keel, S. I. and Lee, S. B., 2004, "Comparative Study of Flame Structures and NO_x Emission Characteristics in FIR and FGR Combustion System," *International Journal of Energy Research*, Vol. 28, pp. 861-885.
- (14) Lutz, 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 SAND 96-8243*.