

혼합층의 지연효과를 배제한 비정상 대향류 확산 화염의 소화

이은도* · 오광철* · 이기호** · 이춘범*** · 이의주**** · 신현동*

The extinction of unsteady counterflow diffusion flame without the retardation effect of a mixing layer

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

ABSTRACT

The extinction of unsteady diffusion flame was experimentally studied in an opposing jet counterflow burner using diluted methane. The stabilized flame was perturbed by linearly varying velocity change that was generated by pistons installed on both sides of the air and fuel stream. As the results, the extinction of unsteady flame is dependent not only on the history of unsteadiness, but also on the initial condition. We found that there are several unsteady effects on the flame extinction. First, the extinction strain rates of unsteady cases are extended well beyond steady state extinction limits. Second, as the slope of the strain rate change increases, the unsteady extinction strain rate becomes larger. Third, the extension of unsteady extinction strain rate becomes smaller as the initial strain rate increases. We also found that the extension of the extinction limit mainly results from the unsteady response of the reaction zone because there is no retardation effect of a mixing layer for our experimental condition.

Key Words : Counterflow diffusion flame, Unsteady flame extinction, Linearly varying strain rate, Retardation of a mixing layer

기 호 설 명

a_0 : 초기 변형률

$a_{E,0}$: 정상 상태 소화 변형률

$a_{E,unsteady}$: 비정상 상태 소화 변형률

$a(t)$: 비정상 변형률

u_0 : 초기 혼합층의 두께

$w(t)$: 비정상 혼합층의 두께

$a(t)_{equivalent}$: 등가 변형률

D : 확산 계수

Da : Damköhler 수

χ : 스킨라 소산률

t_{chem} : 반응 특성 시간

1. 서 론

연소 연구에 있어서 유동장은 화염을 규정하는

중요한 인자의 하나이다. 비정상적으로 변화하는 유동장에 의한 화염의 반응은 그 자체로 물리적인 중요성을 가지지만 특히 강한 비정상 유동장 하에 노출되어 있는 난류 화염의 해석에 응용하고자 많은 연구가 진행되어 왔다[1]. 한편 화염의 소화 현상은 화염의 유무를 판단하는 기준으로 연소에 있어 매우 중요한 정보의 하나이다. 본 연구에서는 비정상 유속 변동에 의한 화염의 거동을 소화 과정을 중심으로 살펴보고 이를 통해 화염의 비정상 거동에 대해 연구하고자 한다.

* 한국과학기술원 기계공학과

† E-mail : yejin@kaist.ac.kr

Tel : (042)869-3057, FAX: (042)869-8820

** 현대자동차 연구소

*** 자동차 부품연구소

**** NIST

화염의 비정상 소화 연구는 크게 화염에 가해진 비정상 유동장의 특성에 따라 구분 할 수 있으며 화염과 와동간의 상호 작용을 통한 비정상 소화 연구, 주기적으로 진동하는 유동장 하의 화염의 비정상 소화에 대한 연구, 전개 제트 화염에서의 비정상 소화에 대한 연구 등 세 가지 형태로 나누어 볼 수 있다.

먼저 화염과 와동간의 상호작용을 이용한 연구는 화염과 와동이 만날 때 발생하는 화염의 비정상 거동을 관찰하는 연구로 Rolon이 제안한 이후 대향류 화염과 단일와동간의 상호작용에 대한 연구가 가장 활발히 진행되어 왔다[2]. 이 경우 와동에 의해 화염은 강한 비정상 유속 변동을 겪으며 화염의 모양에 변화가 발생하고 비균일 확산 효과가 나타나는 등 다양한 물리 화학적 효과가 복합적으로 나타난다.

Takagi 등은 정상 상태의 수소/질소/공기 화염에서 비균일 확산 효과에 대해 연구하였으며 비정상 상태에서도 비균일 확산 효과를 살펴보았다[3,4]. Lee 등은 이러한 비균일 확산 효과에 의해 비정상 화염의 소화한계가 정상 상태에 비해 최대 3배이상 커짐을 수치해석을 통해 살펴보았으며 Oh등도 단일 와동에 의한 화염 소화 시 소화한계의 확장을 보고한 바 있다[5,6]. Santoro 등은 비균일 확산 효과가 크지 않은 메탄올을 연료로 하여 와동에 의한 대향류 화염의 소화를 관찰한 결과 비정상 상태의 경우 정상 상태보다 매우 큰 변형률에서 소화가 발생함을 관찰하였으며, 등가 Da수를 도입할 경우 소화 한계의 확장을 보다 정확히 볼 수 있다고 주장하였다[7]. Kyritsis 등은 같은 실험 조건에서 비정상 소화 시 스칼라 소산율을 측정된 결과 등가 Da 수와 비슷한 정도의 소화 한계의 확장이 나타남을 보고하였다[8].

한편 주기적으로 진동하는 유동장에 의한 화염의 비정상 소화는 예혼합 화염에서 Perlman 등의 실험과 확산 화염에서 Kitsler등의 실험 결과 등이 있다[9,10]. 이들은 대향류 화염의 양단에 스피커를 설치하고 유동에 가진을 주었을때 화염의 소화 현상을 관찰하였다. 그 결과 가진의 진동수가 증가할수록 화염의 소화 한계가 확장됨을 보고 하였다. Egolfopoulos 등은 진동하는 유동장 내의 대향류 화염의 소화를 수치 해석한 결과 낮은 진동수에서 화염은 유동장에 대한 응답 지연이 없는 준정상(quasi-steady) 상태로 거동하며 한 주기 이내에서 소화하지만 약 200Hz 근방에서 화염의 응답 지연 현상이 나타나며, 이 영역에서 몇 번의 주기를 거친 이후에 화염의 소화가 나타남을 보고 하였다[11].

Park 등은 상방향 전개 제트 화염을 대향류 화염과 상사하여 비정상 확산 화염의 온도 변화와

거동을 살펴보고[12], Lee 등은 하방향 전개 제트 화염에서 선형적으로 변화하는 변형률에 따른 화염의 온도 변화와 소화 특성을 살펴보고 대향류 화염을 이용한 결과와 비교하였다. 그 결과 비정상 상태의 경우 정상 상태에 비해 화염 소화 한계가 확장되고 같은 변형률에서 더 높은 온도가 나타남을 보고하였다[13].

지금까지 살펴본 바와 같이 비정상 유동장에 의한 화염의 소화현상을 관찰하기 위한 다양한 노력들이 있어왔다. 그러나 이전의 연구에 이용된 비정상 유동장은 화염의 초기 조건을 규정하기가 모호하거나, 화염의 모양 변화를 일으키거나, 화염면의 이동이 있는 등 비정상 효과 이외의 다른 물리 화학적 효과들이 함께 나타나고 있다. 이에 본 연구에서는 비정상 효과 이외의 다른 효과들을 최소화하여 실험 장치를 구성하고 비정상 유속 변동에 의한 화염의 소화를 관찰하였으며 혼합층의 비정상 거동과 점근 해석을 통한 관계식을 이용하여 본 연구에 사용된 비정상 유동장의 특성을 살펴보았다.

2. 2장 실험 장치 및 방법

2.1 실험 방법

2.1.1 실험 장치

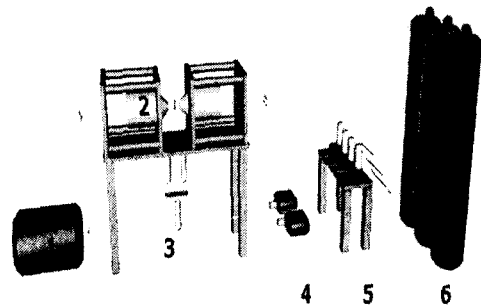


Fig. 1 Experimental setup (1.surge tank, 2.counterflow burner, 3.piston, 4.mixing chamber and orifice, 5.MFC, 6.gas tank)

본 실험에서는 순수 메탄올 질소로 희석시켜 연료로 사용하였고, 수분을 제거한 공기를 산화제로 사용하였다. 실험 장치의 구성은 Fig.1과 같다. 유량은 MFC(Brooks 5850E)를 사용하여 조절하였고 조절된 유량은 2L의 부피를 가지는 혼합 챔버와 오리피스를 지나 버너로 공급된다.

대향 제트 형태의 버너에 안정화된 화염에 피스톤을 이용하여 유속 변동을 가하고 화염의 소화 과정을 HICCD를 이용하여 관찰하였다. 유속 변동을 일으키는 피스톤 부는 2개의 상단 피스톤

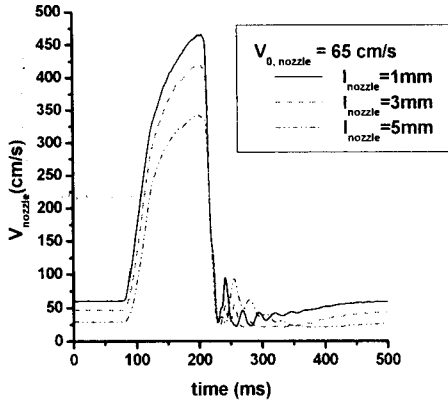


Fig. 2 Unsteady velocity change(different locations form nozzle exit)

과 1개의 하단 피스톤으로 이루어 졌으며 하단의 피스톤은 상단의 두 피스톤을 구동시키는 역할을 담당하며 압축 공기를 사용하여 그 속도를 조절한다. 상단 피스톤의 출구는 유량 제어부에서 버너로 이어지는 유로와 T형태로 연결되어 있어 하단 피스톤이 아래로 내려오는 동안 각 유로의 유체를 상단 피스톤에 저장했다가 하단 피스톤이 위쪽으로 올라가는 동안 버너로 연료와 공기를 공급하며 유속 변동을 일으키게 된다. 유속 변동의 크기는 하단 피스톤의 이동 속도와 상단 피스톤의 직경에 의해 결정되게 된다. 본 연구에서는 하단 피스톤의 구동을 위해 4기압의 압축공기를 사용했고 상단 피스톤의 직경을 20mm, 30mm, 40mm로 바꾸어가며 서로 다른 유속 변동을 가하였다. 서지 탱크를 이용하여 피스톤 구동 시 압축공기의 압력 변화를 최소화 하였고 모든 피스톤의 행정거리는 50mm로 사용하였다. 화염을 안정화 시키기 위해서 주위류로 N2를 사용하였고 주유동과 같은 크기의 유량을 공급하였다. 또한 두 노즐 사이의 거리는 14mm로 고정하여 실험하였다.

2.1.2 비정상 유속 변동

Fig.2는 피스톤으로 유속 변동을 가하였을 때 노즐 출구에서 각각 1mm, 3mm, 5mm 떨어진 산화제측의 노즐 출구 속도 변화를 열선 유속계를 이용하여 측정한 결과이다. 각 위치에서 동시에 유속 변동이 일어나므로 유동장의 변화에 지체 효과가 없고 전체 유동장을 비압축성 유동장으로 해석해도 무리가 없음을 확인할 수 있다.

Fig.3은 서로 다른 초기 유속을 가질 때 같은

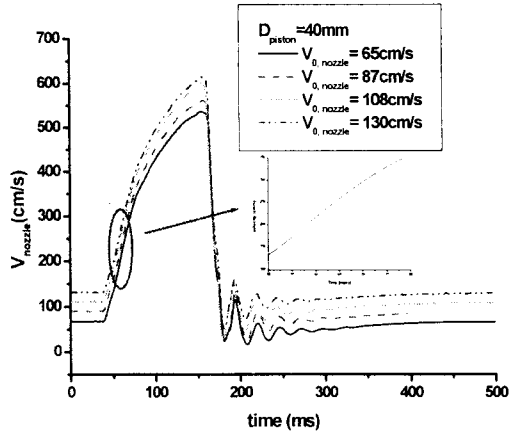


Fig. 3 Linearly varying velocity change

유속 변동에 대한 노즐 출구의 유속 변화를 측정 한 결과이다. 초기 유속이 점차 증가함에 따라 유속 변동의 크기가 증가하며 유속 변동의 모양은 관심 있는 영역에서 선형적임을 확인할 수 있다. 또한 초기 유속이 변화해도 유속 변동을, 즉 유속 변동의 기울기는 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다

3. 3장 결과 및 고찰

3.1 화염의 비정상 소화 특성

3.1.1 다양한 기울기에 따른 소화 특성



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)
Fig 4. The extinction process of unsteady flame

Fig.4는 노즐 양단에 비정상 유속 변동을 가했을 때 화염의 소화가 일어나는 모양을 HICCD를 이용하여 촬영한 결과이다. 유속 변동이 진행됨에 따라 바깥쪽에서 축 방향으로 화염의 소화가 일어나기 시작하며 이는 대향 제트 화염의 경우 반경방향의 변형률의 분포가 발생하기 때문이다[14].

$$a = \frac{V_c}{L} \left(1 + \frac{V_F}{V_c} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_c}} \right) \tag{1}$$

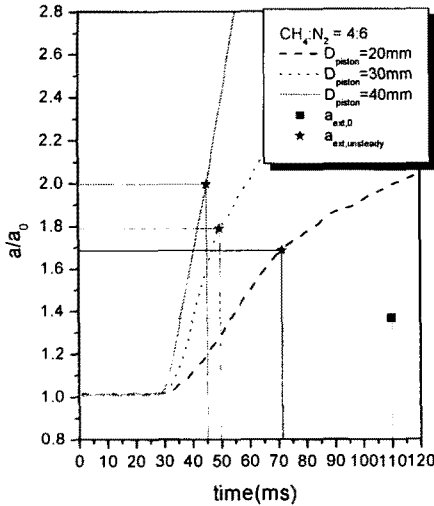


Fig 5. The extinction of unsteady flame with increasing the slope of velocity change (CH₄:N₂=4:6)

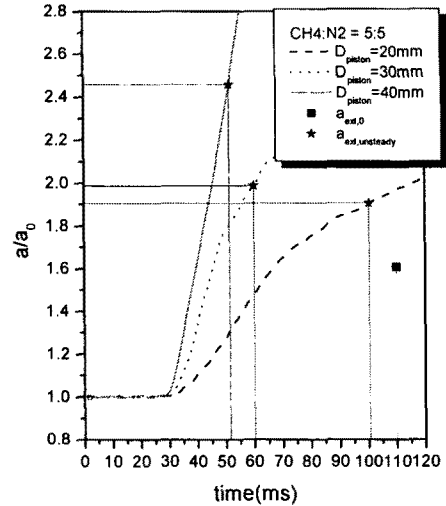


Fig 6. The extinction of unsteady flame with increasing the slope of velocity change (CH₄:N₂=5:5)

유속 변동을 가했을 때 화염의 모양이 변화하지 않고 공간적인 이동이 거의 없으므로 노즐 출구의 유속을 통해 유동장의 변형률을 식(1)과 같이 예측할 수 있다[15].

Fig.5는 서로 다른 증가율을 가지는 유속 변동에 의한 비정상 화염 소화 특성을 살펴본 결과이다. 초기 변형률을 고정하고 유속 변동을 주기위한 상단 피스톤의 직경을 각각 $D_{piston} = 20\text{mm}$, 30mm , 40mm 로 증가시키며 유속 변동을 가했을 때 시간에 따른 유속의 변화를 식(1)에 대입하여 변형률을 계산하고 초기 변형률로 무차원화 하였다. 유속 변동의 변화가 시간에 대해 선형적이며 피스톤의 직경이 증가함에 따라 유속 변동의 기울기가 점점 급해짐을 알 수 있다. 그래프에 정상 상태의 소화 변형률과 비정상 유속 변동에 의한 소화 변형률을 같이 도시하였다.

결과를 살펴보면 모든 비정상 소화 실험에서 정상 상태에 비해 소화 변형률이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 유속 변동의 기울기가 점점 증가함에 따라 최종 소화에 걸리는 시간은 짧아지지만 비정상 소화 변형률은 점점 증가하고 있음을 확인할 수 있다. Fig.6은 연료측의 메탄과 질소의 비율이 5:5로 높이고 실험한 결과를 나타내며 정상 상태의 소화 변형률이 증가하여도 비정상 소화 변형률의 거동이 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 이렇게 비정상 상태에서 최종 소화 변형률이 정상 상태에 비해 크게 증가하는

결과는 다시 말해 비정상 유속 변동을 겪는 화염의 소화 한계가 확장 되었다고 할 수 있으며 이는 앞서 Kistler[10]등이 주기적으로 진동하는 유동장을 통해 접근한 결과나 Santoro[7]등이 대항류 화염에 마이크로 제트를 분사하여 얻은 결과와 물리적으로 같은 의미를 갖는 결과이며, Lee[13]등이 전개 제트에서 보고한 결과와 그 경향이 일치한다.

3.1.2 초기 변형률에 따른 소화 특성

Fig.7은 초기 변형률을 $86.7(1/s)$ 에서 $181.5(1/s)$ 로 순차적으로 변화 시키며 같은 피스톤 ($D_{piston}=40\text{mm}$)을 이용하여 유속 변동을 가했을 때 화염의 소화 특성을 살펴보았다. 선형적인 변형률 증가를 보이는 지점의 변형률 변화의 기울기 평균은 약 $K = 8200(1/s^2)$ 이다. 모든 경우에 대하여 화염의 소화가 일어나기까지 선형적인 형태의 변형률 증가가 나타나고 있음을 알 수 있다. 변형률의 변화를 살펴보면 같은 유속 변동을 가했을 때 초기 변형률이 증가함에 따라 같은 시각의 변동된 변형률의 크기는 점점 커지지만 유속 변동의 기울기는 일정함을 알 수 있다.

화염의 소화 특성을 살펴보면, 연료측의 메탄 비율을 CH₄ : N₂ = 4:6, 5:5, 6:4로 증가시키며 따라 각 경우의 정상 상태와 비정상 상태 최종 소화 변형률이 증가한다.

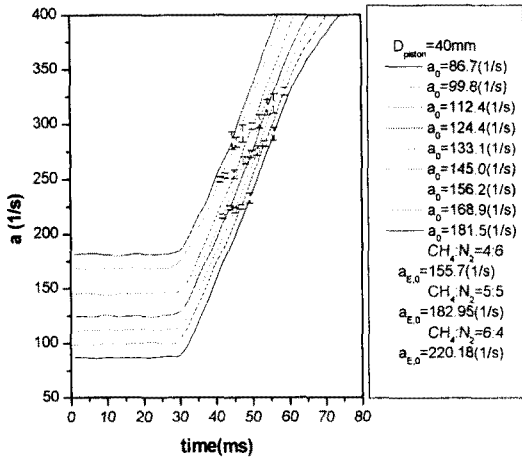


Fig. 8 The change of extinction strain rates with respect to various initial strain rate

이때 초기 변형률이 증가하면 최종 소화 변형률이 점점 감소하고 이러한 경향은 모든 연료축 혼합 분율에 대해 같은 경향으로 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 Kistler[10]가 진동하는 유동장에서 살펴본 결과와 같은 경향이다.

한편 Fig.7과 같은 경우는 화염을 준 정상 상태로 해석할 수 없는 경우이다. 일반적으로 시간 스케일의 비교를 통해 유동의 시간 스케일에 비해 화학 반응의 시간스케일이 작다는 가정 하에서 화염의 구조를 준정상 (quasi-steady) 상태로 가정하고 화염이 외부 유동장의 변화에 대해 매우 빠르게 반응하여 같은 유동 조건 하에서는 같은 구조를 이루고 있다고 생각한다. 만약 Fig.7의 조건에서 화염이 유속 변동에 대하여 준 정상 상태로 반응한다면 초기 변형률에 관계없이 화염은 같은 소화 변형률을 가져야 할 것이다. 그러나 위 결과에서 보듯이 일정한 방향성을 가지는 비정상 유동장 하의 화염은 초기 조건이 달라지면 화염의 최종 소화점이 달라지므로 이 경우는 준 정상 상태라는 가정과 맞지 않다. 즉 관찰 시점의 외부 유동장에 의해 지배받는 것이 아니라 그 이전 시간에 외부 유동장에 의해 겪은 영향들이 현재에 다시 영향을 미치게 되므로 그 화염이 겪은 시간 역사를 고려해야 보다 정확히 화염의 비정상 거동을 모사할 수 있음을 간접적으로 보여주고 있다.

Fig.8은 Fig.7의 비정상 상태의 소화 변형률을 정상상태 소화 변형률로 무차원화 하여 초기 변형률에 대하여 다시 그린 그래프이다. 초기 변형률이 증가함에 따라 비정상 소화가 일어나는

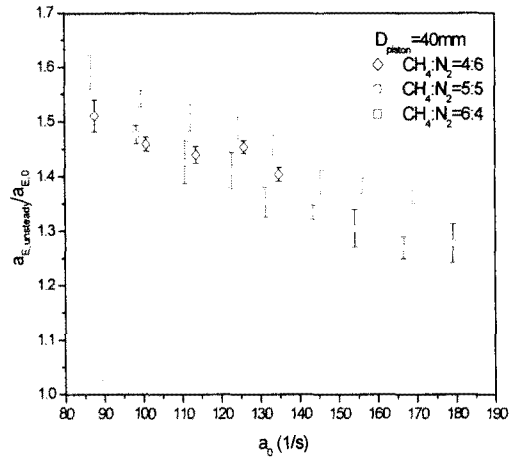


Fig. 8 The changes of extinction strain rates with respect to various initial strain rates

변형률이 줄어들고 있음을 보다 명확히 살펴볼 수 있으며 초기 조건이 소화 변형률에 접근할수록 비정상 효과에 의한 소화 한계의 확장이 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.2 혼합층의 비정상 거동

3.2.1 1차원 혼합층의 비정상 거동

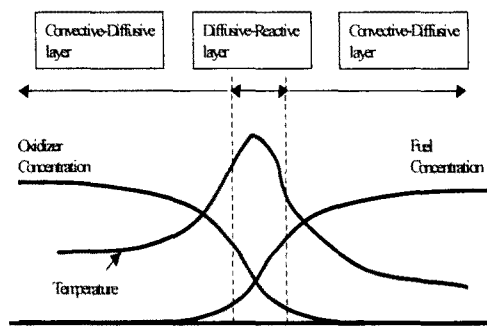


Fig. 9 The structure of a diffusion flame

Fig.9는 확산화염의 일반적인 구조를 나타낸 그림이다. 위 그림에서 보듯이 화염의 구조는 크게 대류-확산 영역(convective-diffusive zone)과 확산-반응 영역(diffusive-reactive Zone)으로 나눌 수 있다. 우리가 변형률에 변화를 주는 것은 대류-확산 영역에 변화를 주는 것을 의미하며 이 효과가 확산-반응 영역에 변화를 일으킬 때 비로소 화염의 반응으로 나타나게 된다. 따라서

유속 변동을 통한 비정상 화염의 연구에서 비정상 효과는 크게 두 가지 원인에 의해 발생할 수 있다. 그 첫 번째가 대류-확산 영역에서 나타나는 비정상 효과이고, 두 번째는 확산-반응 영역에서 나타나는 비정상 효과이다.

대류-확산 영역에서 나타나는 비정상 효과는 대류항이 매우 빠르게 변화할 때 물질의 확산에 응답지연이 발생하는 것으로 이는 화염의 반응과 관계없이 비반응 유동장에서 유체역학 적으로 나타나는 비정상 효과이다. 확산 영역의 거동은 대향류 화염의 비정상 혼합층의 거동을 통해 살펴볼 수 있다. 아래 식 (2)는 비정상 변형률에 의해 영향을 받는 혼합층의 두께에 대한 지배 방정식이다[16].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{w(t)^2}{2} \right) + a(t)w(t)^2 = D \quad (2)$$

위 식은 일계 미분 방정식으로 적분 인자를 통해 적분이 가능하며 초기 혼합층의 두께와 어떤 시간 t의 혼합층의 두께의 비는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{w(t)}{w_0} \right)^2 = \frac{2a_0 \int_0^t \exp \left[\int_0^t 2a(t') dt' \right] dt + 1}{\exp \left[2 \int_0^t a(t') dt' \right]} \quad (3)$$

한편 혼합층의 두께와 Da 수 변형률과 식(4)의 관계에 있으므로

$$\begin{aligned} \frac{Da}{Da_0} &= \left(\frac{1/X_{st}}{t_{chem}} \right) \left(\frac{t_{chem}}{1/X_{st}} \right)_0 = \left(\frac{w(t)^2}{Dt_{chem}} \right) \left(\frac{Dt_{chem}}{w_0^2} \right) \\ &= \frac{w(t)^2}{w_0^2} = \frac{a_0}{a_{equivalent}} \quad (4) \end{aligned}$$

이를 통해 대류항의 변화를 나타내는 비정상 변형률 a(t)에 대한 혼합층의 변화를 고려한 등가 변형률 a(t)_{equivalent} 를 식 (5)와 같이 구할 수 있다[7].

$$\frac{a_0}{a(t)_{equivalent}} = \frac{2a_0 \int_0^t \exp \left[\int_0^t 2a(t') dt' \right] dt + 1}{\exp \left[2 \int_0^t a(t') dt' \right]} \quad (5)$$

식 (5)는 초기 변형률을 알고 비정상 변형률 a(t)의 시간 거동을 알면 대류-확산 영역에서 비정상 효과를 고려하여 실제 화염이 겪는 등가 변형률 a(t)_{equivalent}를 구할 수 있다.

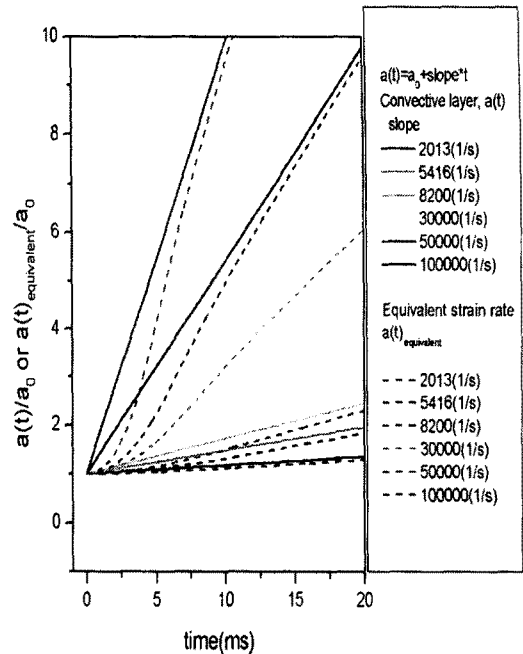


Fig. 10 The retardation of a mixing layer with respect to the rapid unsteady strain rate change

Fig.10 은 비정상 변형률의 변화에 따른 등가 변형률의 거동을 살펴본 그림이다. 선형함수의 기울기를 바꾸어 시간에 따른 변화율의 증가율에 변화를 주었다. 결과를 살펴보면 단위 시간당 변형률의 증가율이 매우 크지 않으면 혼합층의 비정상 효과가 거의 나타나지 않으며 변형률의 시간 변화율이 큰 경우 변화가 시작된 초기, 등가 변형률의 응답지연 현상을 볼 수 있다. 변형률의 증가율에 관계없이 일정 시간이 흐르면 등가 변형률이 유동장에 가해진 변형률과 같아지는 것을 확인할 수 있으며 대부분의 경우 응답 지연 효과는 10ms 이내에서 나타남을 알 수 있다.

이러한 응답 지연이 있는 경우 실험적으로나 또는 해석적으로 유동장에 가한 변형률의 변화가 혼합층에 영향을 주는 동안 혼합층 내의 반응영역은 유동장의 변화를 느낄 수 없게 되어 연소 반응의 변화 역시 지연되게 된다.

3.2.2 실험 조건에서 혼합층의 지연 효과

Fig.11은 Fig.5의 실험에서 얻은 변형률의 변화를 식(5)에 대입하여 등가 변형률을 구하고 이를 실험값과 함께 도시한 그림이다. 소화가 일어나는 시점에서 등가 변형률과 실험에서 얻은 화염 소화 변형률이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

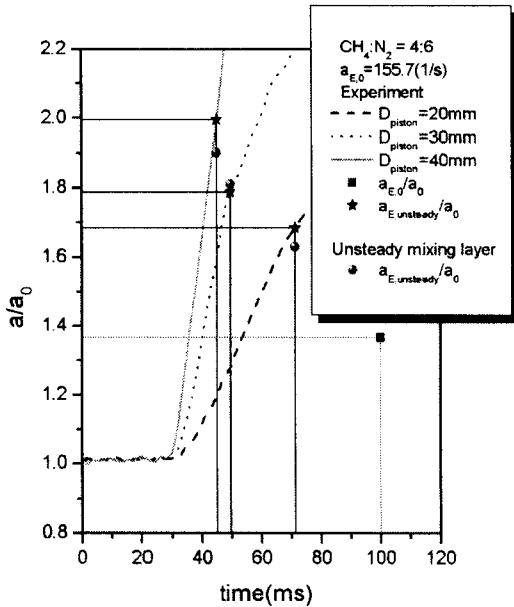


Fig. 11 The comparison of an unsteady strain rate and equivalent strain rate for the experimental condition of this work

실험 조건에서 $D_{piston} = 20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}$ 으로 피스톤의 직경을 늘려감에 따라 유속 변동의 기울기는 점점 급해지고 이때 기울기는 각각 2016, 5416, 8200(1/s²) 등으로 증가한다. Fig.10에서 각 실험 조건에서의 등가 변형률을 살펴보면 관심있는 영역에서 혼합층의 지연 효과가 적음을 재차 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 유속 변동은 앞서 살펴본 혼합층의 응답 지연에 의한 비정상 효과가 거의 나타나지 않는 영역으로 변형률의 변화가 직접적으로 화염에 영향을 주는 영역으로 생각할 수 있다.

3.3 점근 해석

3.3.1 점근 해석을 통한 비정상 화염 소화

활성화 에너지 점근법을 이용한 점근 해석은 Linan 이 정상 상태 화염의 거동을 예측한 이후 소화 현상을 포함한 화염의 연구에 있어 널리 사용되었다[17]. Im 등은 비정상 상태의 화염에 대해 그 지배 방정식을 시간에 따른 유동장의 변화 정보를 내포한 좌표변환을 통해 Linan 이 구한 정상 상태의 지배방정식과 동일한 형태로 만들었다[18]. 이때 화염의 소화가 비정상 상태와 정상 상태에서 물리적으로 동일하다는 가정 하에서 소멸이 일어나는 시점의 reduced Da수를 동일하다고 놓고 비정상 변형률의 변화를 나타내는 함수

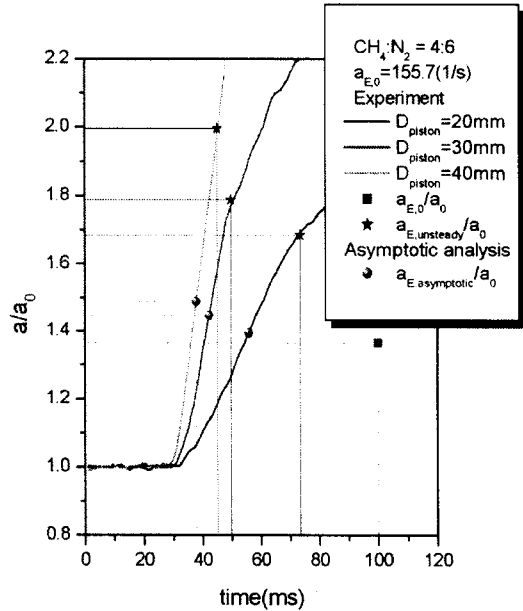


Fig. 12 The comparison of asymptotic and experimental result

인 $f(\tau)$ 를 식 (6)에서와 같이 알고 있을때 비정상 상태의 소화를 예측하는 관계를 식 (7)과 같이 유도하였다.

$$a(t) = a(\tau) = a_0(1 + f(\tau)) \tag{6}$$

$$\frac{a_0}{a_{E,0}} = \frac{2 \int_0^\tau \exp[2f(\tau')d\tau'] d\tau' + 1}{\exp[2 \int_0^\tau f(\tau')d\tau']} \tag{7}$$

초기 변형률 a_0 와 정상 상태 소화 변형률 $a_{E,0}$ 비정상 소화 변형률의 시간에 따른 함수 $f(\tau)$ 의 값을 알면 식 (7)을 이용하여 소화가 일어나는 시간인 τ 를 계산하고 이를 식 (6)에 대입하여 비정상 소화 변형률을 계산하는 방법이다. Fig. 12는 실험에 사용된 변형률의 변화 함수를 식 (7)에 대입하여 얻은 비정상 소화 변형률과 실험을 통해 측정된 비정상 소화 변형률을 함께 도시한 그림으로 초기 변형률을 이용해 무차원화 하여 나타냈다.

실험 결과에서는 각 경우에 대해 비정상 유동에 의한 소화 한계의 확장이 나타나지만 점근 해석에서는 그 정도가 상대적으로 미미함을 알 수 있다. 이렇게 실험 결과와 점근 해석에 차이가 발

생하는 이유는 점근 해석에서 얻은 관계식이 정상 상태와 비정상 상태에서 소화점의 reduced Da 수가 같다는 가정에서 출발하기 때문이다. 이 가정은 결과적으로 비정상 효과에 의해 화염의 반응대의 변화는 고려하지 않고 앞서 혼합층의 해석에서 살펴본 바와 같이 단지 대류항의 변화를 주는 비정상 변형률이 혼합층에 영향을 주는 과정에서 발생하는 응답지연에 의한 비정상 효과만을 고려했기 때문이다.

3.4 혼합층의 지연효과를 배제한 화염의 비정상 거동

앞서 혼합층의 비정상 거동과 점근 해석에서 얻은 관계식을 살펴보면 그 형태도 비슷하지만 물리적으로 고려하는 바가 같음을 알 수 있다. 즉 식 (5)와 (7)에서 각각 계산에 필요한 인자는 서로 다르지만 두 식이 의미하는 물리적 의미는 같으며 이는 변형률의 급격한 증가 시 나타나는 혼합층의 지연 효과만을 비정상 효과로 고려하고 있다. 한편 실험에서 사용된 조건의 비정상 변형률에 대해 이러한 혼합층의 지연 효과를 앞서 기술한 두 가지 방법을 통해 살펴본 결과 혼합층의 지연 효과가 거의 없는 영역임을 알 수 있다.

그러나 이 영역에서 변형률의 비정상적인 변화에 의해 화염의 최종 소화 변형률이 확장됨을 Fig. 5-Fig.8의 결과를 통해 알 수 있었다. 따라서 본 실험에서 살펴본 화염의 소화 특성의 변화는 혼합층의 지연 효과를 배제한 상태에서의 화염의 비정상 거동으로 볼 수 있다. 이는 시간에 따른 변형률의 증가가 비정상적인 연소 반응을 일으켜 생긴 결과로 이 실험 조건은 변형률의 변화가 화염의 반응에 직접적으로 영향을 주는 영역으로 유동장의 변화에 대한 반응의 비정상 거동을 독립적으로 살펴본 결과라 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 안정한 대류류 화염에 피스톤을 이용하여 급격한 유속 변동을 가하였을 때 화염의 비정상 거동을 관찰하였다. 그 결과 비정상 유속 변동이 가해질 때 화염 모양에 변화가 없고 초기 위치에서 움직임이 거의 없음을 확인하였다. 다양한 화염의 조성에서 화염의 초기 조건과 유속 변동의 크기를 바꾸어가며 화염의 거동을 살펴본 결과 화염의 비정상 거동은 화염의 초기 조건과 유속 변동의 기울기에 의해 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었으며 그 결과를 정리하면 아래와 같다.

첫째 비정상 상태의 경우 정상 상태에 비해 소화 한계의 확장이 일어남을 알 수 있었다.

둘째 시간에 따른 유속 변동의 기울기가 심해질수록 소화 한계의 확장 폭이 더 커짐을 확인할 수 있었다.

셋째 초기 변형률이 증가할수록 비정상 효과에 의한 소화 한계의 확장 폭이 감소함을 확인하였다.

한편 1차원 혼합층의 비정상 거동과 점근 해석에서 얻은 관계식을 이용해 실험에 사용된 유속 변동의 효과를 평가한 결과 본 연구의 유속 변동 범위는 대류-확산 영역에서의 응답 지연이 미미한 영역으로 유속 변동의 효과가 혼합층의 지체효과 없이 연소 반응에 직접적으로 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과는 화염의 비정상 거동을 주로 소화의 관점에서 관찰한 것으로 혼합층의 지연 효과를 배제한 상태에서 유속 변동에 의한 비정상 연소 특성의 변화를 살펴볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Peters, N., 1984, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion", Prog. Energy Comb. Sci., Vol.10, pp.319
- [2] 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
- [3] Takagi, Thoshimi, Yoshikawa, Yuzuru, Yoshida, Kenji, Komiyama, Masaharu and Kinoshita, Shinichi, 1996, "Studies on Strained Non-premixed Flames Affected by Flame Curvature and Preferential Diffusion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 27, pp.1103-1110
- [4] 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

- [5] Lee Jerry C, Frouzakis Christos E, and Bouloushos Konstantios, 1999, "Numerical Study of a Opposed-Jet H₂/Air Diffusion Flame-Vortex Interaction", ICDER 99]
- [6] 오창보, 박정, 이창언, 2002, "와동과 상호작용하는 대향류 비예혼합 화염의 비정상 응답특성", 제 24회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 52-60.
- [7] 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
- [8] Kritsis, D. C., Santoro, V. S., and Gomez, A., 2000, "Quantitative Scalar Dissipation Rate Measurements in Vortex-Perturbed Counterflow Diffusion Flames", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29
- [9] Pearlman H. G. and Sohrab S. H., 1995, "Extinction of Counterflow Premixed Flames Under Periodic Variation of the Rate of Stretch", Combustion Sci. and Tech. Vol. 105, pp.19-31
- [10] 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
- [11] Egolfopoulos, F. N., 1994, "Dynamics and Structure of Unsteady, Strained, Laminar Premixed Flames.", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.25, pp.1365-1373.
- [12] Park, J. and Shin, H. D., 1995, "Experimental Investigation of The Developing Process of An Unsteady Diffusion Flames", Combustion and Flame Vol. 110, pp.67
- [13] 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
- [14] 이기호, 이은도, 오광철, 이춘범, 신현동, 2002 "대향류 화염의 비정상 거동에 대한 연구", 제 25회 KOSCO Symposium 논문집, pp.33-39.
- [15] 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.251-25
- [16] Haworth, D. C., Drake, M. C., Pope, S. B. and Blint, R. J., 1988, "The Importance of Time-Dependent Flame Structure in Stretched Laminar Flamelet Models for Turbulent Jet Diffusion Flames", Proceedings of the Combustion Institute, Vol.22, pp.589-597
- [17] Linan, A., 1974, "The Asymptotic Structure of Counterflow Diffusion Flames for Large Activation Energies", Acta Astronautica, Vol.1, pp.1007-1039
- [18] 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