

대향류 화염의 비정상 거동에 대한 연구

이기호* · 이운도* · 오광철* · 이춘범** · 신현동***

Unsteady behavior of counterflow flame

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

ABSTRACT

Unsteady behaviors of counterflow flame were studied experimentally in opposing jet counterflow burner using diluted methane. To generate the unsteadiness on the flame, the counterflow diffusion flame was perturbed by velocity changes made by the pistons installed on both sides of the air and fuel stream. The velocity changes were measured by Hot-wire and Laser Doppler Velocimetry, and the flame behaviors were observed by High speed ICCD and ICCD.

In this investigation, the spatial irregularity of the strain rate caused the flame to extinguish from the outside to the axis during the extinction, and we found the following unsteady phenomena. First, the extinction strain rates of unsteady cases are much larger than those of the steady ones. Second, the extinction strain rates become larger as the slope of the change of the strain rate increases. Third, the unsteady extinction strain rates become smaller with the increase of the initial strain rate.

Key Words : counterflow diffusion flame (대향류 확산 화염), extinction (소멸), laminar flamelet (층류 화염편), strain rate (변형률), unsteady (비정상)

기 호 설 명

$V_{co-flow}$	Co-flow velocity [cm/s]
$V_{inner\ nozzle}$	Flow velocity [cm/s]
a	Strain rate [1/s]
a_0	Initial strain rate [1/s]
D_{piston}	Diameter of piston [mm]

1. 서 론

자동차 엔진이나 보일러 같은 대부분의 실세 연소 시스템은 매우 복잡한 난류 유동하에서 연소를 동반하는 시스템으로 이 시스템의 해석은

위해서는 난류 화염의 해석이 필수적이다. 난류 화염의 해석에 널리 적용되고 있는 층류 화염편 모델(laminar flamelet model)은 난류 화염의 순간적인 구조가 국소적으로 층류 화염 구조를 가지며, 난류 화염의 평균적인 구조가 이러한 층류 화염편(laminar flamelet)들의 앙상블로 해석할 수 있다고 가정하므로,[1,2] 층류 화염의 구조에 대한 이해가 난류 화염 해석의 기반이라 할 수 있다. 이에 대향류 확산 화염(counterflow diffusion flame)은 화염의 형태를 1차원으로 가정할 수 있어, 유동장 내의 화염 해석에 용이한

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 자동차부품연구원

*** 한국과학기술원 기계공학과

장점을 가지므로, 이제까지 화염편 모델에 다양하게 적용되어 왔다. 특히, 대향류 확산 화염은 변형률(strain rate)로 대표되는 유동의 변화에 의한 화염의 영향을 살피는데 있어 가장 유용한 방법으로 사용되고 있다.

기존의 화염편 모델은 층류 화염편이 난류 유동장에서 발생하는 평균 스칼라 소산율(mean scalar dissipation rate)의 변화에 대해 빠르게 반응한다는 가정하에 난류 유동장에서 화염의 구조가 준 평형(quasi-equilibrium) 상태로 보고 있다. 그러나, 이러한 가정을 통한 화염편 모델의 적용은 실제 실험 결과의 예측에 한계를 보이며, 이는 실제 화염은 난류와 같은 급격한 변화를 수반하는 유동장에 대해 일정한 지체 시간을 가지고 반응하며, 그 구조 역시 시간에 따라 변화하기 때문이다.[3] 따라서, 비정상 상태의 화염 거동에 대한 연구는 화염편 모델의 개선 및 실제 난류 화염 해석 판단에 필수적이며, 이에 기존의 많은 연구자들이 이러한 비정상 상태가 화염에 미치는 효과에 대해 연구해 왔다. 특히, 수치 해석적인 방법을 통한 연구는 비교적 활발히 진행되었으나[4,5], 비정상 상태가 가지는 특성 때문에 실험적인 연구는 매우 제한적인 방법에 의해 수행되었다. 대표적인 실험적 연구로 Lee[6]등은 전개 제트(evolvering jet)를 사용하여 시간 변화에 대한 변형률 변화 및 온도의 변화를 실험하였고, Santoro[7]등은 대향 제트(opposing jet)형태의 대향류 버너에 미세 노즐(micro nozzle)을 사용하여 화염과 와(vortex)의 상호반응을 관찰하였으며, Mueller[8]등은 음향 가진(acoustic excitation)을 통하여 화염과 와(vortex)의 상호반응을 관찰하였고, Kistler[9]등과 Decroix[10]등은 증폭기(amplifier)와 스피커(speaker)를 이용하여 음향 가진을 통한 화염의 거동을 관찰하였다. 그러나, 이러한 기존 연구들은 화염의 비정상 효과 이외에 불완전한 초기조건, 화염의 굴곡에 의한 효과, 모호하게 정의된 유동장 등의 서로 다른 효과가 화염에 함께 영향을 주어, 온전한 비정상 효과를 살펴보는 데 한계를 가지고 있었다.

이에 본 연구에서는 대향 제트(opposing jet)형태의 대향류 버너에 명확한 초기 조건 및 비정상 상태 조건을 구현할 수 있는 피스톤을 사용하였고, 이를 통해 비정상 화염 거동을 얻었으며, 이것으로부터 확산 화염의 비정상 상태의 화염 거동을 소하 근처영역에서 연구하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 유량 조절

본 실험에 사용한 각각의 가스 유량을 조절하기 위해서, MFC(mass flow controller)를 사용하였으며, 0.5 %이내의 오차범위에서 유량을 조절하였다. 연료측은 연료(메탄 : CH_4)와 희석제(질소 : N_2)가 충분히 혼합하기 위해서, 혼합 챔버(Mixing Chamber)를 통한 후, 연소기로 공급하였으며, 산화제는 공기를 사용하여 MFC 통과 후 연소기로 공급하였다.

2.1.2 연소기(Counterflow burner)

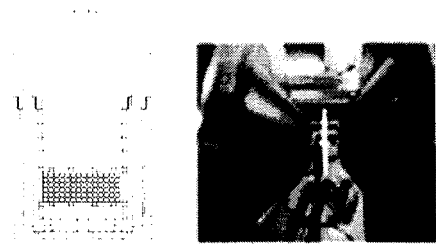


Fig.2-1 연소기 구조 및 화염 사진

실험에 쓰인 연소기(counterflow burner)는 다음과 같다. 대향 제트(opposing jet)형태를 가지는 대향류 버너의 전체 길이는 약 186mm이고 직경은 100mm이다. 버너의 노즐 출구에서 일정한 유동(uniform flow)을 유지하도록 축소형 노즐(contraction)을 사용하였으며, 버너의 중간부분에 스크린 메시(screen mesh)와 구슬(glass bead)을 삽입하여 균일한 유동장을 얻도록 하였다. 안쪽 노즐(inner nozzle)의 직경은 14mm, 주위류 노즐은 20mm의 직경을 가지며 안쪽 노즐의 두께는 0.5mm이하로 제작하여 유동에 영향을 최소화하였다. 양 노즐 끝단 사이의 간격은 14mm로 하였다. Fig.2-1은 연소기 구조와 화염의 사진을 나타내고 있다. 여기서, 화염의 사진은 화염의 형상과 안정한 화염이 유지되고 있음을 알 수 있다.

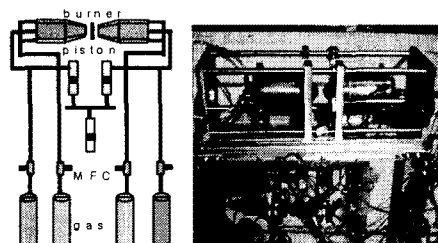


Fig2-2. 실험장치 개략도 및 장치 사진

Fig.2-2는 실험 장치의 개략도와 장치 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연료와 공기, 주위류의 유량을 각각 MFC로 제어하며 연료와 공기측 유로에는 공압 피스톤을 설치하여 유속 변동이 가능하도록 하였다. 연료와 공기 유로의 공압 피스톤은 양단에 같은 크기의 유속 변동을 가하기 위해 하단의 구동 피스톤에 연결되어 함께 움직이며, 구동 피스톤은 피스톤의 사이드와 압축 공기의 압력과 유량으로 그 속도를 조절한다.

2.2 실험 방법

2.2.1 속도 측정

속도 측정을 위하여 열선 풍속계(Hot-wire)와 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하였다. LDV 측정 시에는 0.05 μm의 산화 알루미늄 입자를 사용하였으며, Kim[11]이 사용한 입자 발생기를 사용하였다.

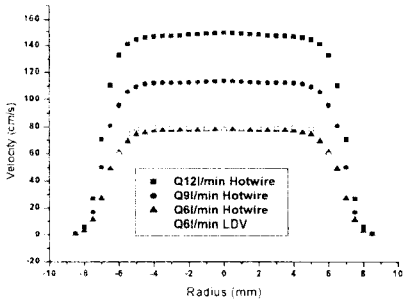


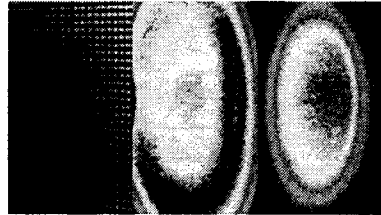
Fig.2-3 단일 제트에서 유량에 따른 중심 노즐의 축방향 속도 분포

Fig.2-3은 단일 제트(single jet)에서 유량에 따른 중심 노즐의 축 방향 속도 분포를 나타내고 있다. 열선 풍속계(Hot-wire)와 LDV로 각각 측정해본 결과 같은 유량에서 큰 차이 없는 유속 분포를 보이며, 다양한 유량에 대하여 균일한 유속을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

2.2.2 화염 촬영

정상 상태에서 각 조건에 따른 화염의 형태를 촬영하기 위해, 화염의 CH 화학 발광을 촬영하였다. CH 화학발광은 ICCD 카메라와 CH 필터(431nm ± 10nm)를 사용하여 촬영하였다. Fig.2-4는 주위류 유속변화에 따른 화염 형태의 변화를 보여주고 있다. CH 라디칼의 경우 화염 면을 45도 각도로 촬영하여 중심을 기준으로 우측의 화학발광이 공간적인 적분 효과에 의해 너

강하게 촬영되었으므로 상대적으로 왜곡이 적은 중심부를 기준으로 하여 비교하였으며, 화염의 실제 위치는 Fig2-4(a)의 1mm 간격의 격자를 이용하여 측정하였다.

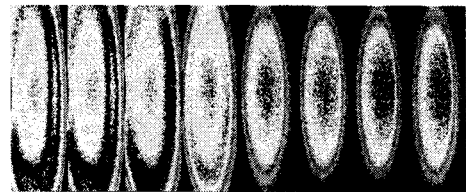


(a) (b) (c)
Fig2-4. 화염의 CH화학 발광
(a)단위 격자
(b)주위류 유속이 낮은 조건
(c)주위류 유속이 높은 조건

한편, 피스톤으로 가진을 주어 비정상 상태 조건에서 화염의 거동을 HICCD (High speed ICCD camera)와 ICCD 카메라와를 사용하여 촬영하였다. 이 때, 피스톤에 의한 유속 변동과 두 카메라사이의 신호를 동기시키기 위해서 신호 지연 발생기(delay generator)를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 주위류 변화에 따른 CH 화학 발광과 유속의 변화



$V_{co-flow}$ [cm/s]
83 94 114 135 156 177 198 219

Fig3-1. 주위류 유속변화에 따른 CH화학발광 변화

비정상 화염 거동 관찰이전에 정상 상태의 안정된 화염의 구조를 먼저 살펴보았으며, 특히 주위류의 조건과 변형률의 변화에 따라 발생하는 화염 모양의 변화를 주의 깊게 살펴보았다. 이것은 대향 제트(opposing jet)형태의 대향류 버너에서 초기 조건이 되는 정상 상태의 화염 조건을 보다 명확히 하여 온전한 비정상 효과를 살펴

기 위함이다.

Fig3-1은 질소(N_2)를 주위류로 쓰고, 연료 측에 $CH_4 : N_2 = 40 : 60$ 의 희석된 연료를 130cm/s, 산화제 측에 공기를 130cm/s로 공급할 때, 주위류의 유속증가에 따른 화염의 CH 발광의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 주위류의 유속이 증가함에 따라 환형의 국부적인 소염 지역이 줄어들고, 중심부의 CH 화학 발광의 세기가 커짐을 발견할 수 있었다.

이렇게 환형의 소염대가 나타나는 이유로 주위류에 의한 희석 효과 및 열 손실과 공간적인 변형률의 차이로 크게 두 가지 가능성을 생각할 수 있다. 그러나, 주위류에 의한 희석 효과로는 주위류 유속의 크기가 커짐에 따라 중심부의 반응대 면적이 넓어지는 이유를 설명할 수 없고, 열 손실도 마찬가지로 이유로 물리적인 설명이 불가능하다.

따라서, 화염대에 작용하는 각 공간상의 변형률의 차이가 환형의 소염대의 형성 여부를 결정할 것으로 생각할 수 있다. 이를 확인하기 위해 LDV를 이용하여 반응 유동장의 유속에 대한 정밀한 측정을 통해 화염면을 따라 발생하는 변형률의 공간적 변화를 살펴보았다.

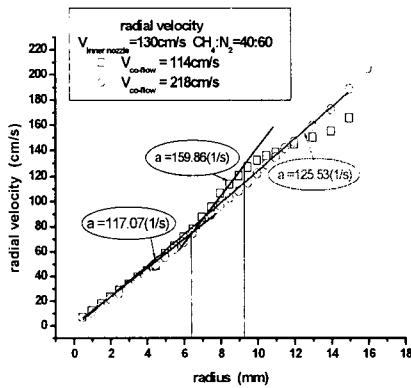


Fig3-2. 주위류 유속변화에 따른 반경방향 유속 변화와 변형률 분포

Fig3-2는 주위류 유속변화에 따른 반경방향의 유속 변화와 변형률 분포를 나타내고 있다. 여기서, 변형률은 반경방향의 속도 구배로 정의되므로, 각각의 경우의 기울기와 일치한다. 그림에서 보는 바와 같이 주위류의 유속이 낮은 경우에는 화염대의 반경방향 변형률이 크게 두 가지 분포로 나뉘며 주위류의 유속이 빠른 경우 전체 공간에 걸쳐 균일한 변형률이 작용하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞의 Fig3-1에서 살펴본 주위류에 따

른 CH 라디칼의 화학 발광의 분포의 경향과 일치하는 결과이다.

Fig3-3은 축방향 유속 분포를 측정하여 변형률을 구한 결과이다. Fig3-2에서 서로 다른 변형률 분포를 대표하는 두 지점($r=0mm$, $r=7mm$)에서의 축방향 유속 분포를 측정하여 변형률을 구하였다. 주위류가 114cm/s일 경우, 서로 다른 속도 구배가 나타나지만, 주위류 218cm/s일 경우는 같은 속도 구배가 나타냄을 알 수 있으며, 두 그림에서 구한 변형률의 크기가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

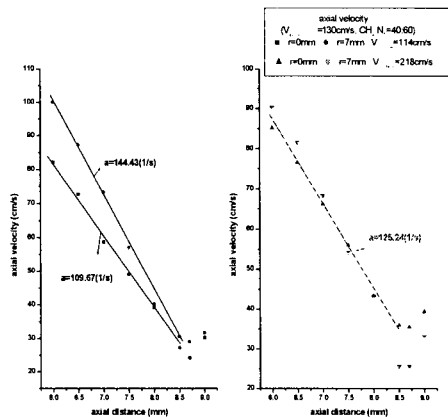
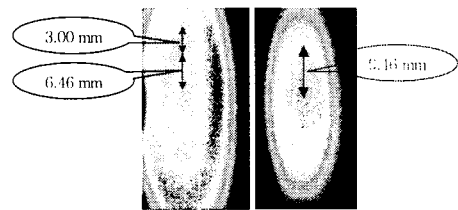


Fig3-3. 주위류 유속변화에 따른 축방향 유속 변화와 변형률 분포



$V_{co-flow}$ 114 218 [cm/s]

Fig3-4. 화염에서 변형률 분포의 실제 위치 ($V_{inner nozzle}=130[cm/s]$)

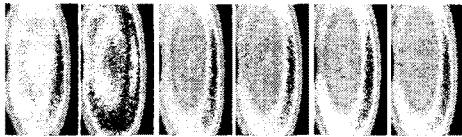
Fig3-4는 ICCD로 촬영한 CH radical의 화학발광 이미지에 Fig3-2에서 얻은 서로 다른 변형률을 가지는 위치를 도시한 그림이다. 주위류 114cm/s 인 경우 CH radical이 감소하여 환이 생기는 영역과 변형률이 큰 분포를 가지는 영역이 거의 일치 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 환이 생기는 영역이 나타나는 이유는 앞서 언급한

내로 높은 변형률에 의한 국부적인 반응 억제 때문임을 확인할 수 있다. 한편, 주위류 218cm/s인 경우 Fig3-2에서 보는 바와 같이 변형률의 공간적인 구배가 나타나지 않고, 전체 변형률이 높지 않으므로, CH radical의 분포가 비교적 균일한 것으로 예상되며, 이는 Fig3-4에서 확인할 수 있다.

3.2 화염의 소멸

3.2.1 정상 상태 화염의 소멸

Fig3-5는 $CH_4 : N_2 = 30 : 70$ 의 희석된 연료를 사용하고 주위류 유속을 일정하게 유지하면서, 유동장의 유속을 증가시키면서 화염의 소멸 한계를 보여주고 있으며, 국부적으로 환형의 소멸대가 관찰되는 주위류 유속과 환형의 소멸대가 나타나지 않는 주위류 유속에서 각각 화염의 소멸을 관찰하였다. 주위류 유속에 상관없이 화염이 소멸에 이르는 주위류의 유속은 거의 일정하고 있으며, 화염이 가장자리에서 가운데로 소멸되는 것을 볼 수가 있었다.



$V_{inner\ nozzle}$ [cm/s]
86.61 92.03 97.44 98.52 99.61 100.69
($V_{co-flow} = 114$ [cm/s])



$V_{inner\ nozzle}$ [cm/s]
86.61 92.03 97.44 98.52 99.61
($V_{co-flow} = 218$ [cm/s])

Fig3-5. 유속 증가에 따른 화염의 소멸 한계

3.2.2 비정상 상태 화염의 소멸

Fig3-6은 비정상 상태 화염이 소멸에 이르는 과정을 촬영한 것이다. HICCD로 화염면을 45도 각도로 촬영하였으며, 동기 신호를 맞추어, 정면에서 ICCD 카메라를 사용하여 화염을 촬영하였다. Fig3-7에서 피스톤 가진의 재현성을 증명

하였으나, 이 경우와 같이 비교적 오랜 시간 동안 비정상 변동을 겪을 경우, 미세한 부분까지 일치하지 않는다. 하지만, Fig3-5에서와 같이 주위류 유량에 상관없이 화염은 가장자리에서 가운데로 소멸되는 것을 볼 수 있어 실험 결과가 서로 일치하는 것을 알 수 있다.



Time (msec)
10 30 32 34 36 37 38 39 41
($V_{co-flow} = 114$ [cm/s])



Time (msec)
10 30 36 40 42 43 44
($V_{co-flow} = 218$ [cm/s])

Fig3-6. 비정상 상태에서의 소멸 화염

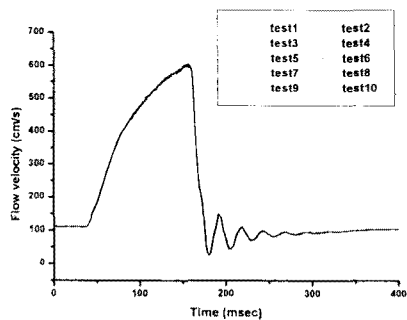


Fig3-7. 피스톤 가진에 의한 유속변동 재연성

Fig 3-7은 비정상 상태 조건을 구현할 수 있는 피스톤 가진에 의한 유속 변동을 열선 풍속계로 측정된 결과이다. 같은 조건하에 10회 실험한 측정치를 종합한 결과로 우수한 재현성을 보임을 알 수 있다.

한편, 화염 거동시 피스톤의 움직임과 카메라

의 구동을 동기시키고, 비정상 상태 화염의 정확한 소염 위치를 파악하기 위하여 피스톤에 ON/OFF 스위치를 부착하고, 신호 지연 발생기(delay generator)와 전기 회로로 동기 시스템 구현으로 관찰할 수 있었다. 피스톤으로 가진을 주었을 때, HICCD으로 화염면을 45도 각도로 촬영하면서, 소화되는데 걸리는 시간을 측정하였으며, 그에 따르는 속도 변화는 열선 풍속계(Hot-wire)로 측정하였다. Fig3-8은 서로 다른 초기 조건에서 피스톤 가진에 의한 유속 변화와 각각의 소염 위치를 표시하였다. 그림에서 비정상 상태에서 소염 변형률이 정상 상태일 때보다 더 높은 것을 관찰할 수 있으며, 속도 변화율이 클수록 다시 말해, 변형률의 시간에 따른 변화율이 클수록 더 높은 변형률에서 소염이 일어나는 것을 볼 수 있다.

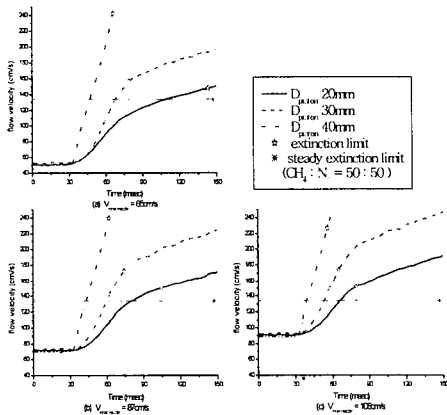


Fig3-8. 서로 다른 초기 조건에서의 유속 변화와 소염 한계

Fig3-9는 초기 변형률 변화와 소염에 이르는 화염과의 관계를 나타내고 있다. 여기서, 직경이 40mm인 피스톤을 사용하였으며, 서로 다른 초기 변형률이 화염의 비정상 거동에 미치는 영향을 두 가지 희석비를 가지는 연료에 대해 살펴보았다. 그림에서 보는 바와 같이, 초기 변형률이 증가할수록 비정상 화염의 소염한계는 감소하는 것을 볼 수 있다.

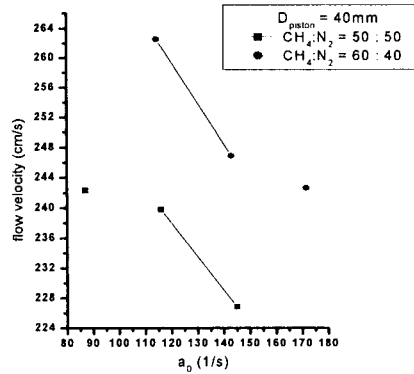


Fig3-9. 초기 변형률변화에 따른 소염 한계

4. 결론

본 연구는 대향류 확산 화염에서의 비정상 거동에 대한 실험적인 연구로 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구에서는 피스톤을 사용하여 선형적인 유속 변동을 구현할 수 있었다. 특히, 안정화된 초기 화염모양의 변화와 공간적인 이동 없이 비정상 유속 변동을 가할 수 있었다. 따라서, 다양한 초기 조건에서 화염의 이동 및 변형을 배제한 온전한 비정상 효과를 관찰할 수 있었다.
2. 대향 제트(opposing jet)형태의 대향류 화염에서는 주위류 유속 변화가 화염의 반응에 영향을 준다. 주위류의 유속이 낮은 경우에는 화염대의 반경방향 변형률이 크게 두 가지 분포로 나누어지며, 주위류 유속이 빨라질수록, 전체 공간에 걸쳐 균일한 변형률이 작용하고 있다. 따라서, 화염대에 작용하는 각 공간상의 변형률의 차이가 화염의 소염대의 형성 여부를 결정한다.
3. opposing jet 형태의 대향류 화염 소화시, 가장 자리에서 가운데로 소염이 일어나며, 정상 상태뿐만 아니라, 비정상 상태에서도 화염은 가장 자리에서부터 소화된다.
4. 비정상 상태일 때, 화염은 더 큰 소염한계에 이르게 되며, 변형률의 시간에 따른 변화율이 클수록 더 높은 변형률에서 소염이 일어나게 된다. 또한, 초기 변형률이 증가할수록 비정상 화염의 소염한계는 감소하게 된다.

후 기

이 연구는 연소기술 연구센터(CERC)와 BK21의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- [1] Peters. N., "Local Quenching Due to Flame Stretch and Non-premixed Turbulent Combustion", Comb. Sci. and Tech., 30,1-17.(1983)
- [2] Peters. N., "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion", Prog. Energy Comb. Sci., 10, 319-339.(1994)
- [3] D. C. Haworth et al., "The importance of time-dependant flame structures in stretched laminar flamelet models for turbulent jet diffusion flames", Twenty-Sencond Symp.(int.) on Combustion, The Combustion Institute 589-597,(1988)
- [4] N. Darabiha et al., "Transient behavior of laminar counterflow hydrogen-air diffusion flames with complex chemistry", Combust. Sci. and Tech., Vol86, 163-181(1992)
- [5] Fokion N. Egolfopoulos, et al., "Unsteady counterflowing strained diffusion flames: diffusion-limited frequency response", J. Fluid Mech, Vol 318, 1-29(1996)
- [6] E. J. Lee, K. C. Oh, and H. D. Shin, "Experiments in the Transient Effect of the Evolving Jet Diffusion Flames" Twenty-eighth Symp.(int.) on Combustion, The Combustion Institute, 2079-2084.(2000)
- [7] Santoro. V. S., Kyritsis. D. C., and Linan. A., and Gomez. A., "Vortex-Induced Extinction Behavior in Methanol gaseous Flame: a Comparison with Quasi-Steady Extinction" Twenty-eighth Symp.(int.) on Combustion, The Combustion Institute, 2109-2116(2000)
- [8] Mueller. C. J., Driscoll. J. F., Sutkus. D. J., Roberts. W. L., Drake. M. C., and Smooke. M. D., "Effect of Unsteady Stretch Rate on OH Chemistry during a Flame-Vortex Interaction: To Asses Flamelet Models" Comb. and Flame, 100, 323-331(1995)
- [9] J. S. Kistler, C. J. Sung, T. G. Kreutz, C. K. Law, and M. Nishioka, "Extinction of Counterflow Diffusion Flames under Velocity Oscillations" Twenty-sixth Symp.(int.) on Combustion, The Combustion Institute, 113-120(1996)
- [10] Michele E. Decroix and William L. Roberts, "Study of Transient Effect on the Extinction Limits of an Unsteady Counterflow Diffusion Flame" Combust. Sci. and Tech., Vol 146, 57-84(1999)
- [11] N. I. Kim, U. D. Lee, H D Shin, "Laminar Premixed Flame Propagation Using Large Axial Velocity Variation", Twenty-eighth Symp.(int.) on Combustion, The Combustion Institute, 1867-1874(2000)