

저 신장율 대향류 확산화염에서 화염 특성에 관한 버너 간격 효과

윤진한* · 길상인* · 황동진* · 최윤진** · 류정인** · 박정****

Effects of Burner Distance on Flame Characteristics at Low Strain Rate Counterflow Edge Flames

Jin-Han Yun, Sang-In Keel, Dong-Jin Hwang, Yun-Jin Choi, Jung-In Ryu, and Jeong Park

ABSTRACT

Experimental study is conducted to identify the existence of a shrinking flame disk and to clarify its flame characteristics through the inspection of critical mole fraction at flame extinction and edge flame oscillation at low strain rate flames. Experiments are made as varying global strain rate, velocity ratio, and burner distance. The transition from a shrinking flame disk to a flame hole is verified through gradient measurements of maximum flame temperature. The evidence of edge flame oscillation in flame disk is also provided through numerical simulation in microgravity. It is found at low strain rate flame disks in normal gravity that buoyancy effects are importantly contributing to lateral heat loss to burner rim, and is proven through critical mole fraction at flame extinction, edge flame oscillation, and measurements of flame temperature gradient along flame disk surface.

Key Words : Burner Distance, Critical Mole Fraction at Extinction, Edge Flame Oscillation, Flame Disk, Flame Hole, Global Strain Rate, Lateral Heat Loss, Velocity Ratio

1. 서 론

에지화염(Edge Flame) 혹은 부분 예혼합 화염(Partially Premixed Flame)은 예혼합 화염과 확산화염의 중간 범주에 속한다. 대부분의 실제 연소에 있어서 부상화염 등에서 나타나는 등 부분 예혼합화염은 지난 20년 동안 뜨거운 이슈가 되어 왔다. 부분 예혼합화염은 화염 구멍(Flame Hole)[1,2], 부상화염(Lifted Flame)[3-5], 연료베드(Fuel Bed)에서의 전파하는 화염[6], 2차원 혼합층에서의 점화 화염(Ignited Flame)[7] 등에서 관찰되었다. 부분 예혼합화염은 당량비가 1인 지점 혹은 전파속도가 최대인 점을 따라서 전파하며, 흥미로운 점은 전파속도는 양의 값을 가지면 미연가스로 전파하는 점화파(Ignition Wave), 음

의 값을 갖게 되면 기연가스로 퇴각하는 후퇴파(Retreating Wave)가 나타나는 특징을 갖는다. 많은 연구자들이 다양한 시도를 통하여 부분 예혼합화염의 거동특성들을 파악해 왔다. 대향류 화염 구조에서 Santoro 등은 소화 Damköhler Number 근처에서 약한 섭동(Perturbation)을 이용하여 화염구멍의 전체과정에서 화염구멍의 생성, 성장, 복원을 잘 묘사하였고[8], Shay와 Ronney는 축 기준으로 기울여진 대향류 버너에서 국부적으로 의도된 신장율을 갖는 부분 예혼합화염에 대해 연구 하였다[9]. Carnell과 Renfro는 화염 외부가 소화될 만큼의 높은 질소 장막유동(Guard Flow) 속도로 에지화염을 형성 하였다[10]. 그러나 이러한 대부분의 연구들은 높은 스트레치(Stretch)에 의해 생성 되는 에지 화염의 거동에 관한 것들이었다.

Z. Lu와 S. Ghosal은 난류확산화염에서 흔히 볼 수 있는 국부적인 화염소화와 재점화에 대한 화염 구멍(Flame Hole)과 화염 디스크(Flame Disk)에 대하여 연구를 수행하였다[11]. 수축

* 한국기계연구원

** 충남대학교 기계공학부

*** 부경대학교 기계공학부

† 연락처자, jeongpark@pknu.ac.kr

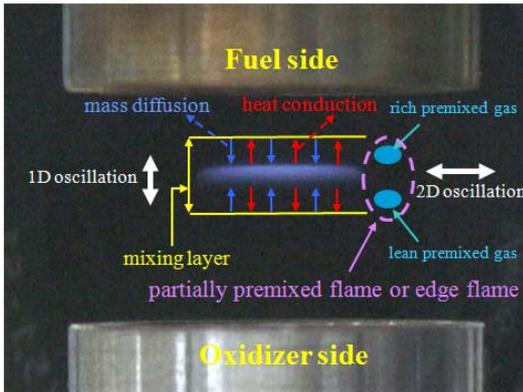


Fig. 1 Low strain rate counterflow flame configuration and its physical description.

(Shrinking)과 확장(Expanding) 하는 구멍(디스크) 영역을 구분하기 위한 임계 구멍(디스크) 반경이 존재함을 보였으며, 임계 구멍은 신장율이 증가(감소)함에 따라 일관되게 감소하고 신장율의 소화한계(점화)에서 한정된 최소한계에 도달한다. 이것의 함축된 의미는 극미량의 에너지원으로는 혼합층의 점화가 불가능하며, 확산화염 위에 생성된 화염 소화 구멍이 너무 작으면 화염의 소화 또한 불가능하다는 의미이다. 지금까지 대부분의 연구는 높은 화염 신장율에서의 연구에 집중되어 있지만, 일부 저신장율 화염의 에지화염거동에 대한 연구[12]가 이루어지고 있다.

K. Maruta 등의 미소중력장 실험에서 저신장율 확산화염의 소화는 복사열손실에 기인한다고 보고하였다[13]. 이러한 사실은 화염반경이 비교적 크고 일차원 화염거동일 경우에 적용할 수 있다. 그러나 Park 등[14]은 실험과 2차원 수치계산을 통하여 저신장율과 고신장율 대항류 확산화염의 소화거동에 대한 차이를 확인하였다. 고신장율 화염에서의 화염소화거동은 화염의 중심으로부터 소화가 일어나기 시작하여 전체적으로 갑자기 소화된다. 그러나 화염크기가 버너직경보다 작은 저신장율화염에서의 화염소화는 화염크기가 줄어들고 함께 화염의 외부로부터 중심부 쪽으로 소화가 일어난다. 이러한 저신장율 화염에서의 소화현상을 수축하는 화염 디스크(Shrinking Flame Disk)으로 정의할 수 있고, 이러한 현상은 화염소화를 포함한 저신장율 화염거동이 다차원 효과(Multi Dimensional Effect)의 영향이라는 결정적인 단서가 된다. 게다가 Fig. 1에서 보는 바와 같이 화염 에지의 농도장의 구성이 부분 예혼합화염의 형상의 모습과 같다. 저신장율 대항류 화염의 화염 디스크에서의 화염거동은 측면방향의 열손실(Lateral Heat Loss), 연료의 루이스(Lewis) 수, 화염복사를 포함한 에지화염 외부의

국소 스트레인에 영향을 받는 복잡한 현상으로 나타난다. 정상 중력장에서의 부력효과는 외곽에 에지화염(Outer Edge Flame)의 국부 화염신장율의 증가와 버너첨단(Burner Rim)에서의 측면열손실의 증가와 상반된 결과로 나타난다. 전자는 C-curve 거동특성상의 저신장율 화염에서의 화염강도를 증가시키는 반면 후자는 화염강도를 약화시킨다. 이전의 연구결과[12]로부터 유추해 보면, 전체 화염신장율의 증가는 에지화염 진동을 억제하고, 측면방향 열손실의 증가는 에지화염 진동에서의 임계 연료 루이스(Le_f) 수를 낮춘다. 후자의 결과는 적절한 열손실이 존재하면 연료 루이스(Le_f) 수가 1보다 작을지라도 에지화염 진동을 일으킬 수 있다는 이전의 결과와 일치한다.

본 연구에서는 저신장율 화염과 관련하여 상대적으로 물리적 설명과 근거들이 기존 연구들에서 약하다 볼 수 있기 때문에 저신장율 대항류 확산 화염 거동특성을 명확히 이끌어 내고자 한다. 에지화염진동 영역을 포함한 화염안정화선도는 전체 화염신장율, 속도비, 버너간 거리 그리고 다차원효과를 명확히 하고자 한다. 또한, 대항류 확산 화염에서 화염표면을 따라서 측정된 화염온도 기울기의 비교를 통하여 측면열손실 양을 정량화하고 화염구멍과 수축하는 화염디스크 화염의 특성을 명확히 보이고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 대항류버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 스테인리스 스틸은 26 mm이다. 대항류 화염에서의 화염대는 산화제 측에 형성되는데, 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서 공급하였고, 산화제는 하부 노즐에서 공급하여 실험하였다.

화염으로부터 복사열전달에 의한 노즐의 과열

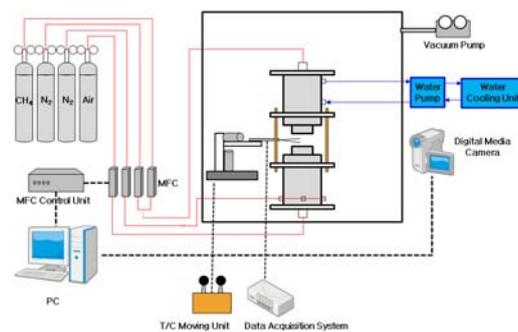


Fig. 2 Schematic diagrams of counterflow burner and flow system.

냉각수를 순환시켰다. 또한 연소 후 발생하는 배기가스와 질소가 쌓이는 것을 방지하기 위하여 진공 펌프를 통해 외부로 배출 시켰으며, 진공펌프의 맥동이 화염에 영향을 주기 않게 하기 위하여 버너 상부에 설치하지 않고 밀폐된 아크릴박스의 공간상에서 흡입하여 배출시켰다. 연료 및 산화제 덕트 내부에는 부정형 매쉬(Mesh)와 미세한 정방형 매쉬 스크린(Mesh Screen)을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였다. 외부로부터의 화염 교란을 막고 후류(Wake Flow)에 의해 유지되는 외측 화염을 제거하기 위해 질소를 장막 유동(Guard Flow)을 하부 버너의 외측 노즐에서 체적유량 10 L/min로 전 실험 범위에서 일정하게 공급하였다. 연료는 99.95%의 고 순도 메탄(CH_4)을 사용하였으며, 화염의 불안정성을 유도하기 위한 희석제로는 고 순도 질소(N_2 , 99.95%)를 희석하여 사용하였다. 또한 산화제로는 고 순도(Zero Grade) 공기를 사용하였다. 본 실험에서 희석제인 질소를 포함한 연료측 루이스 수의 범위는 0.74부터 0.95이고, 산화제 측의 루이스 수는 1.05이다. 질소는 소화조건 근처에서의 연료측 혼합물의 몰분율에서 루이스(Le_f) 수를 1보다 낮게 할 수 있어 과도한 열손실에 의한 불안정성의 관찰을 할 수 있을 것을 기대하여 선택하였다. 이러한 상황에서 화염 불안정성에 의한 진동이 발생하면 화염 열손실에 대한 효과를 명확히 할 수 있다. 대향류 버너로 공급되는 연료 및 산화제를 비롯한 모든 유체는 질량 유량제어기(Mass Flow Controller)를 통해 제어되며, 질량유량 제어기를 제어하는 유닛(FM-30VE)은 컴퓨터를 통해 조절할 수 있도록 하였다. 실험은 전체 신장율(Global Strain Rate)을 일정하게 유지시키면서 희석제의 공급 유량을 증가시키면서 실험하였고, 유량의 제어는 유량조절 프로그램을 통해 자동 제어되도록 하였다. 화염소화에서 임계 몰분율의 측정은 s/w 를 이용하여 스트레인을 고정시키고 희석제 몰분율을 증가시키면서 화염 소화가 나타나는 조건을 찾음으로써 얻을 수 있다. 전체 화염 신장율은 Chelliah 등이 제안한 식을 수정하여 다음과 같이 정의된다[18].

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

여기서, Vr 은 연료와 산화제 측 버너 노즐 출구에서의 속도비(Velocity Ratio)를 의미한다. V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내고, L 은 버너 덕트 노즐 간 거리를 나타내며 아래첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 의미한다. 본

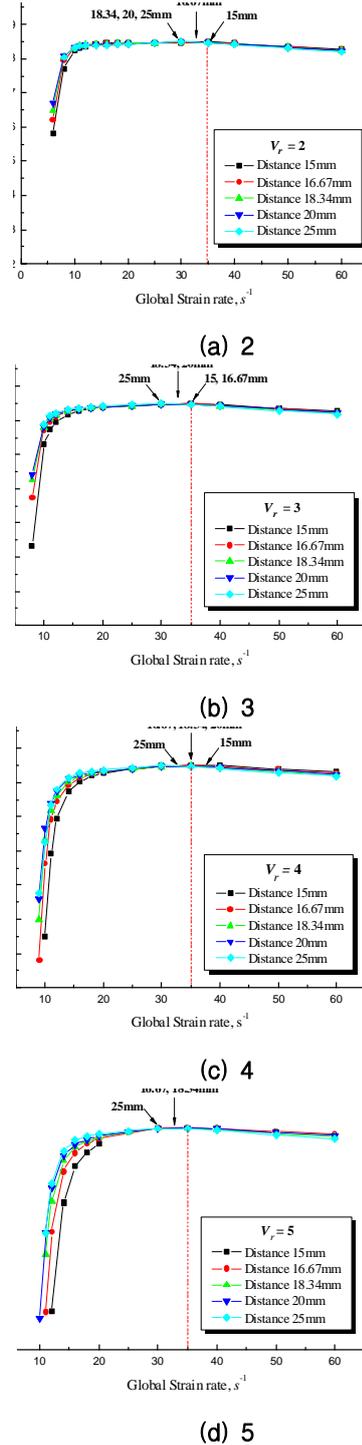


Fig. 3 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate in terms of burner distance at velocity ratios of (a) 2, (b) 3, (c) 4, and (d) 5.

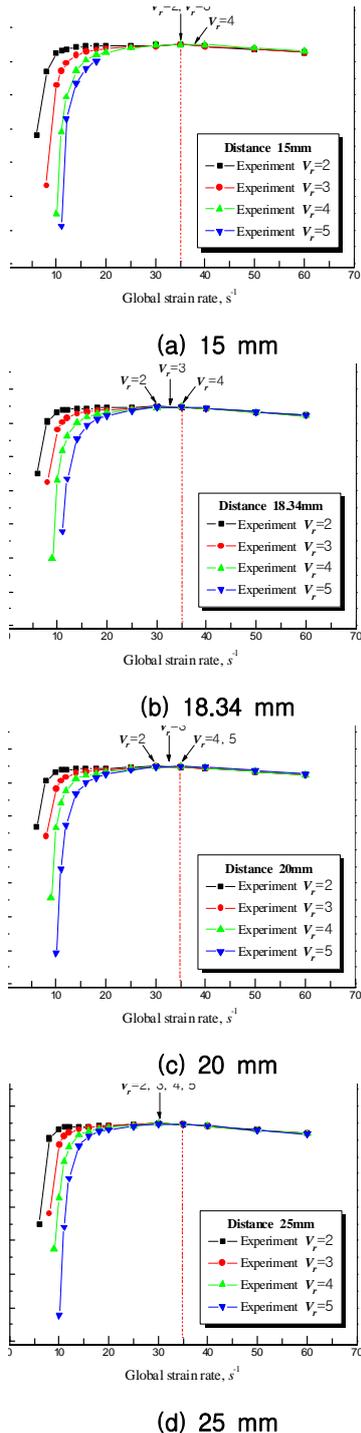


Fig. 4 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate in terms of velocity ratio at burner distances of (a) 15 mm, (b) 18.34 mm, (c) 20 mm, and (d) 25 mm.

실험에서 전체신장율의 범위는 8 s^{-1} 에서 60 s^{-1} 범위로 수행되었다. 화염의 동적 거동은 SONY사의 디지털 미디어 카메라(HDV 1080i)를 이용하여 Frame Rate 30 Hz, 셔터 속도(Shutter Speed) 1/90 sec로 실시간 촬영되었고, PC를 통해 Matlab 기반으로 분석하였다.

또한, 저신장율 대향류 화염의 소화거동 및 화염 불안정에 영향을 미치는 것으로 보고된 측면방향의 전도 열손실의 영향을 파악하고, 저신장율과 고신장율의 대향류 확산화염의 명확한 차이를 보이게 하기 위해 직경 0.075mm R-type 열전대를 사용하여 화염 중심으로부터 반경방향으로 0.5mm 간격으로 화염 온도를 측정 분석하였다. 열전대의 이동은 2차원 전동장치를 이용하여 이송하였으며, 온도 데이터는 Graphtec사의 GL500을 사용하여 각 조건마다 100ms로 30초 이상 저장하여 평균값을 취하였다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 3과 Fig. 4는 속도비((a)2, (b)3, (c)4, (d)5)와 버너 거리가 각각 (a) 15 mm, (b) 18.34 mm, (c) 20 mm, (d) 25 mm에 따른 화염소화한계 그래프이다. 전체 화염신장율에서 일반적인 화염소화거동은 전환점(Turning Point) 이전의 저신장율에서는 무한한 버너거리로 인하여 복사 열손실에 기인하고, 이후의 소화 현상은 화염 스트레치(Stretch)에 의해 발생하며, 임계물분율 선도는 전환점이 존재하는 C-curve의 형태를 갖는다. Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 화염소화에서의 임계질소물분율은 모든 거리와 속도비 조건에서 고신장율 화염 조건에서는 일치하는 결과를 주고 있다. 이것은 고신장율화염이 스트레치에 의한 화염소화에 기인하며 일차원화염의 거동특성을 따르고 있음을 나타낸다. 한편 전체 화염신장율의 전환점(Turning Point)은 버너거리가 감소함에 따라 증가하고, 속도비가 증가함에 따라 증가한다. 저신장율 화염에서의 화염소화 임계물분율은 버너거리가 증가함에 따라 증가하고, 속도비가 감소함에 따라 증가한다. 더욱이 뒤에 설명될 화염반경크기도 같은 경향을 보이는데, 화염크기는 버너거리가 증가함에 따라 증가하고, 속도비가 감소함에 따라 증가한다. 이러한 이유는 측면방향 열손실이 화염크기와 밀접한 관계가 있음을 의미한다.[12]

Fig. 5는 미소중력장 조건에서 예지화염진동이 일어나는지를 알아보기 위하여 C. B. Oh 등[19]이 계산한 방법을 이용하여 수치해석을 수행한 결과이다. 화염반경이 버너직경보다 작은 경우 미소중력장 조건일지라도 저 신장율 화염조건에서 예지화염 진동이 나타났다. 여기서 주목해야

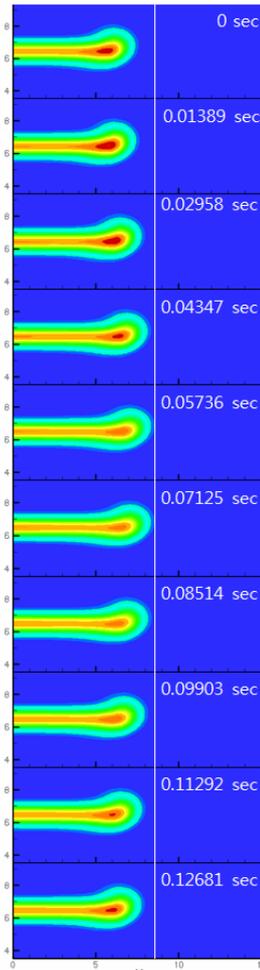


Fig. 5 Temporal evolution of heat release rate in microgravity; $Vr=1$, $\alpha_g=7 \text{ s}^{-1}$, $X_{N_2}=0.82$.

할 것은 계산조건에서 사용된 연료의 루이스 수는 0.94이었으며, 미소중력 화염에서 조차도 에지 화염진동이 가능하며 측면의 전도열손실에 의해 나타날 수 있음을 의미하므로 복사 열손실 이외의 다차원 효과가 나타남을 의미한다.[14] 저신장에서 에지화염 부근에서 형성된 농도장의 형태는 Fig. 1에서 보여준 부분 예혼합화염의 형태와 동일하다. 그렇다면 저신장을 화염 소화의 형태는 외곽에지화염(Outer Edge Flame)이 음의 화염전파속도를 갖는 수축하는 화염 디스크(Shrinking Flame Disk)로 설명되어질 수 있다. 외곽에지화염의 화염전파속도는 그곳의 국부 스트레인율(Local Strain Rate), 복사열손실을 포함한 측면열손실(Lateral Heat Loss), 연료의 루이스(Lef) 수에 지배받게 된다. 통상중력장(Normal Gravity)에서의 부력효과는 외곽에지화염의 국부

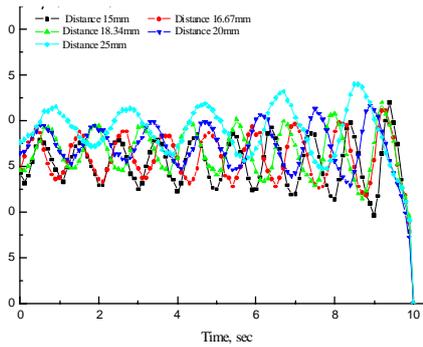
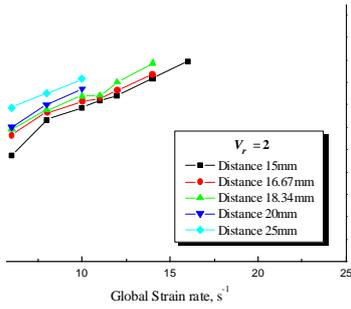


Fig. 6 Temporal variation of radial flame length in terms of burner distance at flame extinction conditions in the case of velocity ratio of 4 and the strain rate of 12 s^{-1}

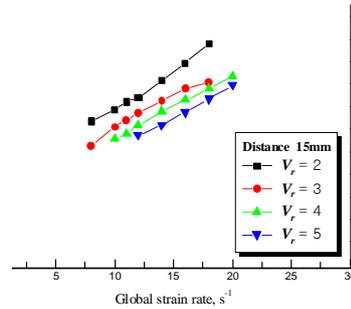
스트레인율의 증가와 버너립으로의 측면열손실의 증가와 상반되게 작용한다. 전자는 C-curve 거동 특성상의 저신장을 화염에서 화염강도를 증가시키는 반면 후자는 화염강도를 약화시킨다.

Fig. 6은 화염소화조건에서 속도비가 4이고, 스트레인율이 12 s^{-1} 일 때, 반경방향 화염길이의 시간에 따른 변화량이다. 측면방향 열손실의 척도[12]가 되는 화염길이는 버너거리에 따라 차이를 보이고 있다. 이러한 점들을 명확히 보이기 위해 버너거리와 속도비를 변화시키면서 화염소화조건에서 전체화염신장을 별로 화염길이를 측정하였다. Fig. 7은 속도비가 (a) 2, (b) 3, (c) 4, (5) 5에서의 버너거리에 따라서 화염소화조건에서 전체 화염신장을 별로 평균 화염길이를 나타낸 그래프이며, Fig. 8은 버너거리 (a) 15 mm, (b) 18.34 mm, (c) 20 mm, (d) 25 mm에서의 속도비에 따라 평균 화염길이를 도시하였다. 평균 화염길이는 전체 화염신장과 버너거리가 증가함에 따라 감소하고, 속도비가 낮아짐에 따라 증가하였다. 이러한 경향은 Fig. 3과 Fig. 4의 화염소화조건에서의 임계물분율 특성과 일치하는 결과를 나타낸다.

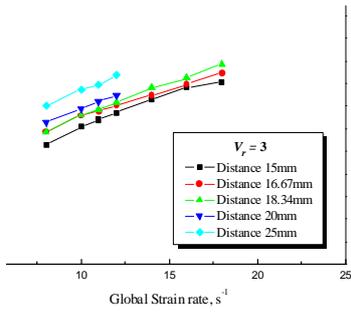
이전에 수행되었던 10 mm[13]와 15 mm[14] 직경의 버너를 가지고 실시된 미소중력장실험에서는 에지화염 진동은 관찰되지 않았다. 그 이유는 버너직경이 너무 작아서 과도한 측면전도 열손실로 인하여 화염진동 없이 바로 소화되었기 때문이다. 비록 본 논문에서는 예비 시험에서 10 mm 버너 정상중력장 조건에서 에지화염 진동 없이 수축하는 화염 디스크(Shrinking Flame Disk)의 형태로 소화된 결과들을 제시하지는 않았지만, 마찬가지로 화염 진동이 발생하지 않았다. 그러나 26 mm 버너를 가지고 수행된 Fig. 5에서 보여 준 미소 중력에서의 수치해석 결과에서 화염길이가 버너 직경보다 작을 때 에지화염



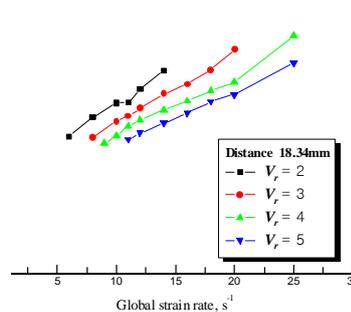
(a) 2



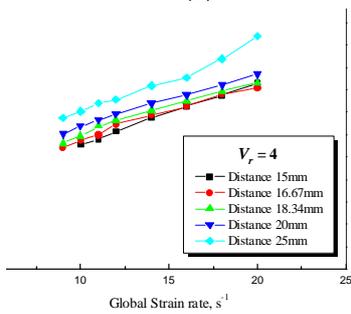
(a) 15 mm



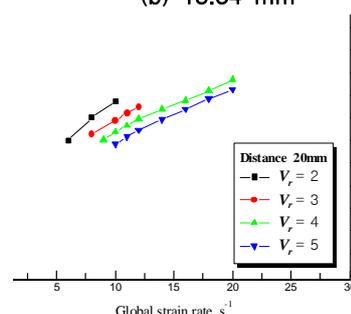
(b) 3



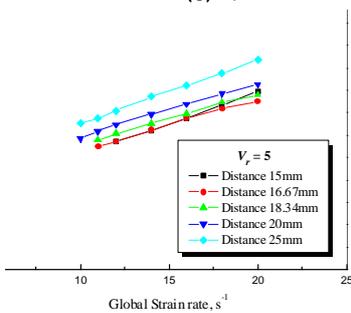
(b) 18.34 mm



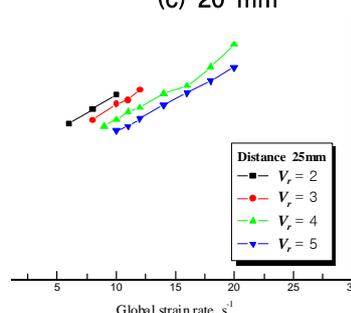
(c) 4



(c) 20 mm



(d) 5



(d) 25 mm

Fig. 7 Variations of mean flame length at extinction with global strain rate in terms of burner distance at the velocity ratios of (a) 2, (b) 3, (c) 4, and (d) 5.

Fig. 8 Variations of mean flame length at extinction with global strain rate plot in terms of velocity ratio at burner distances of (a) 15 mm, (b) 18.34 mm, (c) 20 mm, and (d) 25 mm.

진동이 나타나는 결과로부터 적절한 버너 직경에서는 적절한 측면 열손실이 나타나 루이스(Lewis) 수가 1보다 작을 때에도 측면 열손실에 의해 화염 진동이 발생할 수 있음을 의미한다. 위에서 언급한 결과들을 바탕으로 본 연구의 사전연구로서 26 mm 버너를 가지고 전체화염 신장율과 속도비에 따라서 화염진동 시작점과 진동영역이 포함된 화염안정화선도를 제시하였다. 본 논문에서는 26 mm 버너를 사용하여 버너간 길이를 변수로 하여 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 속도비 4에서 버너거리 별로 전체 화염신장율에 따른 화염진동 시작점과 소화점 영역을 표시한 그래프이다. 버너거리와 전체화염 신장율의 증가가 화염진동을 억제한다. 이러한 경향은 전체화염신장율과 버너 거리의 증가가 Pe (Peclet Number)의 증가를 의미하고 Pe의 증가가 화염진동을 억제한다는 참고문헌의 결과 [15]와 일치한다. 또한 일차원 화염에서 적절한 (과도한) 열손실은 일으킨다는 기존의 연구내용 [15-17]과도 일치하는 결과이다. Margolis[20]와 Buckmaster [21]는 예혼합화염(Premixed Flame)에서 버너팁으로의 열손실이 루이스 수가 1보다 작을지라도 일차원 진동을 유발한다고 보고하였다. Fig. 5에서 미소중력장 조건에서 예지화염진동을 위한 전체신장율은 정상중력장 조건과 비교해서 더 낮게 제한된다는 것을 보여주고 있다. 그 이유는 저 신장율 화염에서 부력효과(Buoyancy Effects)로 인해 버너팁으로의 측면열 손실이 커지기 때문이다. 고신장율화염에서 예지 화염 진동은 화염두께의 감소로 인한 복사열손실의 감소와 부력으로 인한 버너팁으로의 측면열 손실이 무시될 정도로 작고 Pe도 증가하여 화염진동을 억제하므로 나타나지 않는다. 또한, 고신장율 화염에서는 반경방향을 따라서 측면 전도열 손실(Laterally -conductive Heat loss)은 화염길이에 영향을 줄 만큼 충분히 크지 않으며, 화염 길이는 전체 화염신장율의 증가에 인한 영향이다. 본 실험에서 Fig. 9에서의 예지화염 진동 시작점(Onset Point)에서의 연료측 루이스 수의 범위는 0.75에서 0.95이다. 이러한 연료측 루이스 수의 범위는 과도한 열손실이 없다면 한정된 범위 내에서만 화염 진동이 나타날 수 있는 전체 신장율을 제한하게 된다. 따라서 진동영역은 외곽으로의 전도열손실을 포함한 부력효과로 인하여 과도한 측면열손실의 발생으로 버너거리 15 mm 조건에서 넓게 나타났으며, 버너거리가 증가함에 따라 불안정 영역은 좁아지고, 마침내 거리 25 mm 조건에서는 화염소화한계에 근접하게 나타났다. 특히, 버너거리 25 mm 화염조건에서는 부력효과에 의한 버너팁으로의 측면열손실은 무시될 정도로 작은 것으로 판단된다. 25 mm 버너

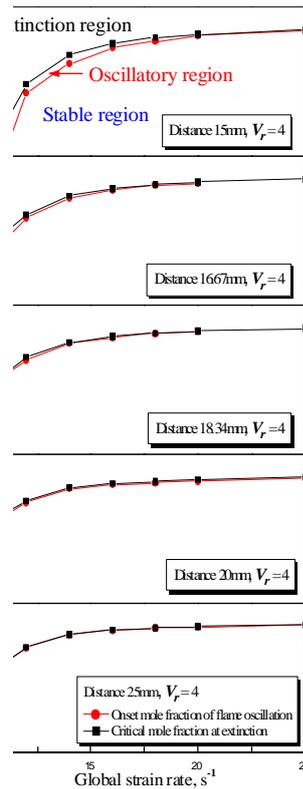
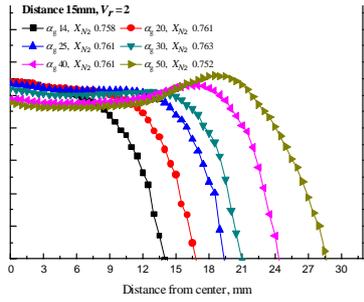


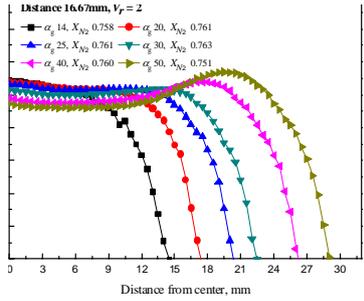
Fig. 9 Variations of oscillatory regime and the onset condition of edge flame oscillation with global strain rate according to burner distance at the velocity ratio of 4.

간격에서의 화염 조건은 결국 Fig. 5에서 보여준 미소중력장 실험에서와 같이 측면전도열손실이 중요해지는 결과와 비슷한 상황일 것으로 판단된다.

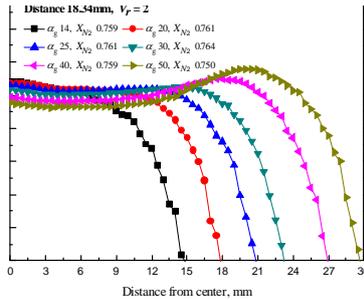
현재 실험들은 화염소화와 예지화염 진동에서의 측면열손실의 중요성을 일관되게 보여주고 있다. 측면열손실은 화염표면의 온도를 측정하고 그 온도 분포의 기울기로서 정량화 할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 화염온도를 측정함으로써 저신장율과 고신장율 화염을 구분하는 하나의 방법으로 사용될 수 있다. Fig. 10은 속도비 2 조건에서 버너거리 15 mm부터 20 mm까지 전체 화염신장율에 따른 반경방향의 화염온도분포이다. Fig. 11은 버너거리 20 mm에서 속도비 2에서 4 까지 조건을 변경하였을 때의 온도분포이다. 화염 표면을 따라 측정된 모든 화염온도는 Fig. 3과 Fig. 4의 화염소화점을 기준으로 90%의 질소 희석 조건에서 실시되었다. 이러한 조건은 전 실험범위에서 0.075 mm 두께의 열전대를 화염에 투입하였을 때 화염소화와 화염 진동이 일어나지



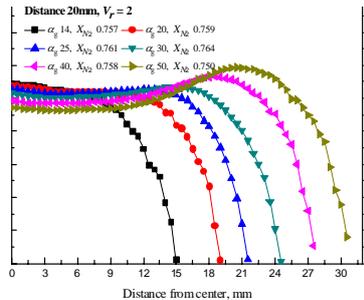
(a) 15 mm



(b) 16.67 mm



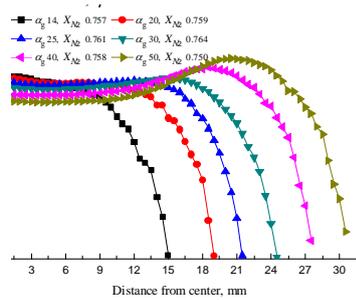
(c) 18.34 mm



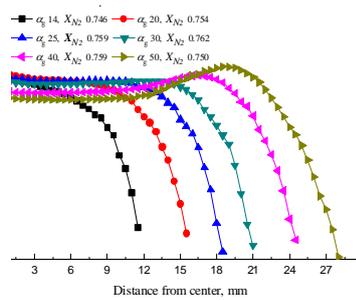
(d) 20 mm

Fig. 10 Radial distributions of flame temperature with global strain rate at the velocity ratio of 2 for the burner diameters of (a) 15 mm, (b) 16.67 mm, (c) 18.34 mm, and (d) 20 mm.

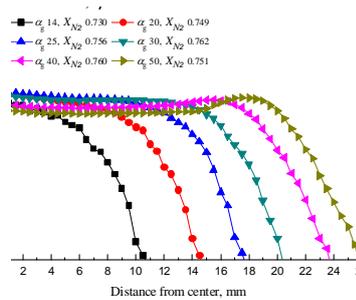
않은 조건을 선정한 것이다. 고신장을 화염에서는 화염의 최고 온도는 외곽에지화염 근처에서 나타났으며, 최저 온도는 화염의 중심에서 나타나지 않고 화염 중심으로부터 유한한 거리에서 나타났다. 이러한 온도분포는 저신장과 고신장을 화염의 천이구역(Transient Regime)으로 판단되며, 더 높은 고신장을 화염으로 가면 화염의 중심에서 최저온도점이 나타날 것으로 생각된다. 한편, 고신장을 화염에서 외곽에지화염 주위에서의 화염온도 하락은 측면전도열손실에 기인된다. 그러나 전환점(Turning Point)의 전체 신장을보다



(a) 2

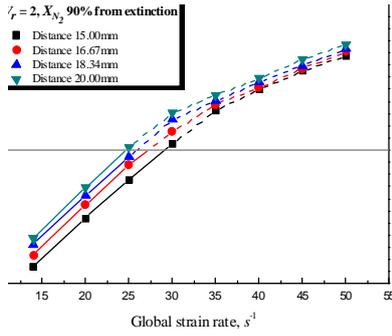


(b) 3

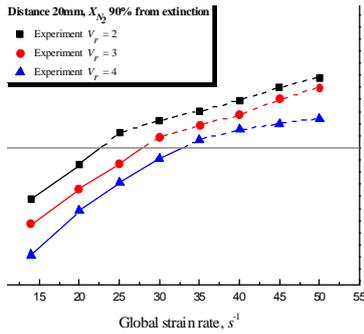


(c) 4

Fig. 11 Radial distributions of flame temperature with global strain rate at the burner distance of 20 mm for the velocity ratios of (a) 2, (b) 3, and (c) 4.



(a) burner distance at the velocity ratio of 2



(b) velocity ratio at the burner distance of 20 mm

Fig. 12 Variations of maximum temperature gradients along the flame surface with global strain rate in terms of (a) burner distance at the velocity ratio of 2 and (b) velocity ratio at the burner distance of 20 mm.

낮은 저신장을 화염에서는 화염의 중심에서 최고점이 나타나고, 반경방향이 증가할수록 일정하게 낮아지는 경향을 보이고 있다. 즉, 고신장을 화염에서의 화염표면을 따라 측정된 온도기울기는 양의 기울기를 보이는 반면, 저신장을 화염에서는 음의 기울기를 갖는다. 이것은 저신장과 고신장을 화염의 소화메커니즘의 차이를 보여주는 결과이다. 전환점 이전의 저신장을 화염에서의 화염소화는 외곽에서부터 소화가 시작되어 화염의 중심쪽으로 이동하면서 소화된다. 저신장을 화염에서만 보이는 이러한 화염소화 거동은 수축하는 화염디스크 메커니즘이라 할 수 있다. 반면, 화염소화가 최소화온도 위치에서 시작되어 화염 구멍이 확장되는 구조로 화염소화가 일어나는 것이 화염 구멍 메커니즘임을 알 수 있다.

Fig. 12는 전체 화염신장을 변화시키면서 측정된 화염표면 온도의 최대 화염온도기울기 (Max. Flame Temperature Gradient)를 나타낸

그림으로, (a)는 속도비 2에서 버너거리에 따른 최대 온도 기울기이고 (b)는 버너거리 20 mm에서 속도비에 따른 그래프이다. 전환점보다 낮은 저신장을 화염에서의 최대 화염온도 기울기는 모든 조건에서 1350 K 이상의 온도 조건에서 기울기를 구하였으며, 전환점 이상의 고신장을 화염에서는 최저 화염온도에서부터 최고화염온도 값까지의 기울기를 취하였다. 그러므로 저신장을 화염에서의 음의 온도기울기는 측면열손실이라는 것을 반영하는 것이고, 고신장을 화염에서 0인 화염기울기는 수축하는 화염디스크로부터 화염구멍으로 화염특성이 바뀌는 변환점이라는 것을 의미한다. 측면열손실(Lateral Heat Loss)은 전체 화염신장과 버너거리가 감소함에 따라 그리고 속도비가 증가함에 따라 증가한다. 이러한 경향은 앞서 설명한 화염소화 임계물분율과 화염길이 측정 결과와 일치하는 것이다. 수축하는 화염디스크에서 화염구멍으로 천이될 때의 전체 화염신장은 버너거리가 감소함에 따라 증가하고 속도비가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 수축하는 화염디스크에서 화염구멍으로 천이될 때의 전체 화염신장은 Fig. 3과 Fig. 4의 C-curve 상의 소화임계물분율에서 보여준 전환점(Turning Point)과는 일치하지 않고, 더 낮은 전체 화염신장에서 나타난다. 즉, Shrinking Flame Disk에서 Flame Hole로 천이될 때 전환점이 앞당겨진다는 것을 의미한다. 정상중력장 실험에서의 측면열손실은 부력효과에 의한 버너립으로의 한정된 열유동에 의한 영향이 클 것으로 판단된다. 정상중력장 조건에서의 부력효과는 외곽에지화염로컬신장의 증가와 버너립으로의 측면열손실의 증가와는 상반되게 작용한다. 전자는 C-curve 거동특성상의 저신장을 화염에서 화염강도를 증가시키는 반면 후자는 화염강도를 약화시킨다. 그러나 앞서 말한 실험결과들에서 보여준 바와 같이 정상중력장 조건에서 후자는 예지화염 진동과 소화에 크게 지배적이다. 하지만, Fig. 5의 미소중력장 조건에서 전체 화염신장이 $10 s^{-1}$ 보다 낮음에도 예지화염 진동이 일어나고 있음을 보여주고 있다. 이것은 측면으로의 열손실의 기여가 복사열손실을 포함하여 매우 중요하다는 것을 의미한다. 즉, 정상중력장 실험에서 부력효과에 기인한 버너립으로의 측면 열손실이 화염의 소화와 예지화염 진동에 중요하게 작용하고 있으며, 복사열손실과 측면의 전도열손실을 포함하여 수축하는 화염디스크(Shrinking Flame Disk)의 화염 동적 거동이 지배를 받고 있는 것으로 이해될 수 있다. 그러나 속도비가 증가함에 따라 그리고 버너거리가 감소함에 따라 버너립으로의 측면열손실은 왜 증가하는가라는 질문에 대한 정확한 설명은 정확한 측면열손실 양과 더불어 부력에 의한 연료와

산화제의 열유속 방향을 묘사할 수 있는 수치계산을 통하여 조만간 보고될 수 있을 것으로 기대한다.

4. 결 론

질소를 희석제로 한 저신장을 메탄/공기 대향류 화염에 대한 실험적 연구를 통하여 버너거리, 전체 화염신장을 그리고 속도비에 따른 실험결과들로부터 수축하는 화염디스크(Shrinking Flame Disk)의 화염특성들을 명확히 하고자 하는 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

화염소화 부근에서 화염 표면을 따라 측정된 화염온도의 최대화염기울기의 결과로부터 수축하는 화염디스크(Shrinking Flame Disk)에서 화염구멍(Flame Hole)로 천이가 일어나는 화염특성을 확인하였다. 수치계산결과를 통하여 미소중력장 조건임에도 불구하고 예지화염진동이 일어났으며, 결국 복사열손실과 더불어 측면전도열손실이 중요하다는 것을 알 수 있었다. 정상중력장 조건의 저 신장을 화염에서 부력효과에 기인된 버너립으로의 측면열손실은 화염의 소화와 예지화염 진동에 중요한 역할을 하며, 화염소화와 예지화염 진동의 모든 임계물분율 결과들은 부력효과에 의해 나타나는 측면열손실이 주요한 원인임을 알 수 있었다. 결국 통상 중력장에서 화염은 복사열손실이외에도 측면 전도열손실과 부력에 의한 측면 열손실이 수축하는 화염 디스크(Shrinking Flame Disk)의 화염 특성에 중요한 역할을 한다.

후기

본 연구는 2008년 한국기계연구원 기본사업의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] H. G. Im, J. H. Chen, "Structure and Propagation of triple flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures", *Combust. Flame*, Vol. 119, pp 436-454, 1999.
 [2] K. M. Lyons, K. A. Watson, C.D. Carter, J.M. Donbar, "On flame holes and local

Extinction in lifted-jet diffusion flames", *Combust. Flame*, Vol. 142, pp 308-313, 2005.
 [3] B. J. Lee, S. H. Chung, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", *Combust. Flame*, Vol. 109, pp 55-70, 1997.
 [4] J. Lee, S. H. Won, S. H. Jin, S. H. Chung, "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air", *Combust. Flame*, Vol 135, pp 449-462, 2003.
 [5] A. Upatnieks, J. F. Driscoll, C. C. Rasmussen, S. L. Ceccio, "Liftoff of Turbulent Jet Flames-Assessment of Edge Flame and Other Concepts using cinema-PIV", *Combust. Flame*, Vol 138, pp 259-272, 2004.
 [6] H. D. Ross, "Ignition of and flame spread over laboratory-scale pools of pure liquid fuels", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 20, pp 17, 1994.
 [7] L. J. Hartley, J. W. Dold, "Flame propagation in a nonuniform mixture: analysis of a propagating triple-flame", *Combust. Sci. Tech.* Vol. 80, pp 23-46, 1991.
 [8] V. S. Santoro, A. Liñán, A. Gomez, "Propagation of edge flames in counterflow mixing layer : experiments and theory", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp2039-2046, 2000.
 [9] M. L. Shay, P. D. Ronney, "Nonpremixed edge flames in spatially varying straining flows", *Combust. Flame*, Vol. 112, pp 171-180, 1998.
 [10] W. F. Carnell Jr., M. W. Renfro, "Stable negative edge flame formation in a counterflow burner", *Combust. Flame*, Vol. 141, pp 350-359, 2005.
 [11] Z. Lu, S. Ghosal, "Flame holes and flame disks on the surface of a diffusion flame", *J. Fluid Mech.* 513 (2004) 287-307.
 [12] Park, J. S., Hwang, D. J., Park, J., Kim, J. S., Kim, S., Keel, S. I., Kim, T. K., Noh, D. S., "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flame," *Combust. Flame*, Vol. 146, pp. 612-619, 2006.
 [13] K. Maruta, M. Yoshida, Y. Ju, T. Niioka, "Experimental study on methane-air premixed flame at small stretch rates in microgravity", *Proc. Combust. Inst.* Vol. 26, pp 1283, 1996.
 [14] J. Park, C. B. Oh, K. T. Kim, J. S. Kim, A. Hamins, "Multi-dimensional Effects on Low Strain Rate Flame Extinction in Methane/air Counterflow Non-premixed Flame", *Proc.*

ASPACC, Vol. 5, pp 345~348, 2005.

[15] M. Short, Y. Liu, "Edge-flame structure and oscillations for unit Lewis numbers in a non-premixed counterflow", *Combust. Theory Modelling*, 8 (2004) 425-447.

[16] V. N. Kurdyumov, M. Matalon, "Dynamics of an Edge Flame in a Mixing Layer", *Combust. Flame*, 139 (2004) 329-339.

[17] R. Daou, J. Daou, J. Dold, "The effect of heat loss on flame edges in a non-premixed counterflow within a thermo-diffusive model", *Combust. Theory Modelling*, 8 (2004) 683-699.

[18] H. K. Chelliah, C. K. Law, T. Ueda, M. D. Smooke, F.A. Williams, "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 (1990) 503.

[19] C. B. Oh, C. Lee, J. Park, "Numerical Investigation of Extinction in Counterflow Nonpremixed Flame Perturbed by a Vortex", *Combust. Flame*, 138 (2004) 225-241.

[20] S. B. Margolis, "Bifurcation phenomena in burner-stabilized premixed flames", *Combust. Sci. Tech*, Vol. 22, pp 143-149, 1980.

[21] J. D. Buckmaster, "Lecture on mathematical combustion", *SIAM J, Appl. Math.* Vol. 43, pp 1335-1349, 1983.