



공 학 석 사 학 위 논 문

대향류확산화염에서 화염소화와 에지화염거동에 관한 연구



부경대학교대학원

에너지시스템공학과

박 대 근

공 학 석 사 학 위 논 문

대향류확산화염에서 화염소화와 에지화염거동에 관한 연구



부경대학교대학원

에너지시스템학과

박 대 근

박대근의 공학석사 학위논문을 인준함.

2011년 1월 5일



목차	i
Nomenclature	iii
초록	iii

제	I장 서 론
	1.1 연구의 필요성 1
	1.2 연구 목적 및 내용 4
제	Ⅱ장 이론적 고찰
	2.1 대향류 확산화염 12
	2.2 S-curve 거동 특성······ 14

제	Ⅲ장	실험장치 및 방법	18
	3.1 실험	험장치	19
	3.1.1	대향류버너	19
	3.1.2	상부버너 냉각수 순환장치	21
	3.1.3	질량유량 제어기	22
	3.2 실학	역방법	23

3.2.1 대향류화염의 소화특성 가시화	23
3.2.2 화염분석을 위한 Matlab 기법	24
3.2.3 실험조건	25

제 IV장	실험결과 및 고찰	••••	·28
4.1 장	막유동 유량변화에 따른 효과		28
4.1.1	결과 및 논의	•••••	28
4.1.2	결 론		41
4.2 버	너직경 변화에 따른 효과		43
4.2.1	결과 및 논의	h	43
4.2.2	. 결 론		53
제 V장	₫ Z		55
감사의 글	ally		57
참고문헌…			59
영문초록…			66

Nomenclature

а : Local strain rate : Global strain rate a_g : Burner diameter D : Acceleration of gravity g : Thermal conduction k : Separation distance between the fuel and the oxidizer nozzle L : Flame length l_f : Mixing length thickness l_m : Lateral heat loss q_r : Flame radius r_{f} : Temperature Т ot i : Maximum flame temperature T_{max} : Nozzle exit velocity of fuel U_F : Velocity ratio Vr V_a : Axial velocity at oxidizer nozzle exit V_{f} : Axial velocity at fuel nozzle exit, Propagation velocity V_{b} : Buoyant Convection Velocity Xi : Mole fraction of chemical species i mixture fraction Z

Greek Symbols

- : Thermal diffusivity α
- : Freqeuncy f
- : Density of fuel ho_f
- : Density of oxidizer ρ_a
- : Scalar dissipation rate χ

χ . Scalar dissipation rate
GNATIONAL UN
Dimensionless Numbers
S F
$Le_{\rm F} = \alpha / D_{\rm F}$ · Fuel Lewis number
$E_{F} \propto_{st'} E_{F,st}$. Full lewis number
$Pe = LU_f/\alpha$: Density of fuel
St = fD/U . Density of aviding
$D_f = \int D_f O_f$: Density of Oxidizer
A LI OF

대향류확산화염에서 화염소화와 에지화염거동에 관한 연구

박 대 근



유한한 버너직경의 대향류확산화염에서 화염소화 메커니즘, 화염소화 모드, 장막유동의 효 과 그리고 저신장을과 고신장을 화염의 특성의 천이영역을 명확히하고자 실험적연구가 수행 된다. 유한한 버너직경 18.0, 26.0 그리고 46.0 mm 에 대해 저신장을에서 화염진동과 화염소 화는 화염외곽부분의 과도한 반경방향의 전도열손실에 기인함으로 나타났다. 현재의 버너직 경에서 화염소화모드는 세가지로 분류된다. (영역 I - 에지화염이 진동하면서 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역, 영역 II - 에지화염 진동없이 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역, 영역 III - 화염디스크기 수축하지 않고 화염면에 화염구멍이 생성되 어 소화되는 영역) 그 결과 적절히 작은 버너직경으로 수행한 결과 저신장을 화염 특성이 C-curve상의 전환점을 넘어서는 높은 신장을로 확장되는 것으로 나타났다. 또한 각 소화영역 에 대한 임계화염반경이 존재하고, 에지화염 진동은 Strouhal 수와 Peclet 수에 의해 하나의 곡선으로 잘 특성화된다.

제1장 서 론

1.1 연구의 필요성

온실 효과가 사회적·경제적 문제로 부각되면서 CO2 저감은 지난 수년간 미래 사회를 대비하는 차원에서 세계 각국은 시급한 다뤄왔다. CO2 처리 방안으로 전처리 문제로 연소 (pre-combustion), 후처리 연소 (post-combustion), 그리고 산소 연 소 (oxy-combustion)가 제시되어 왔고, 그 중 순산소 연소 기술은 고효율 연소와 연소 배출물 (NOx, CO2 포함)의 두가지를 동시에 해결하고자 하는 측면에서 연구가 진행되는 것이 세계적 흐름이다. 또한, 약 40년 이후에는 석유 고갈이 예측되고 있으며, 유가 급상승 에 따른 방안으로 우리나라 화력발전의 80%가 석탄 화력에 의존하 고 세계적으로 매장량이 최소 200년 사용 가능한 석탄의 적극적 활 용 방안으로 석탄 가스화를 통한 수소 생산을 고려하고 있으며 향 후 연소 기술의 핵심이 될 전망이다. 따라서 미래 수소경제화 사회 를 대비하려는 세계적 추세와 이에 대한 이용 방안들이 연소 연구 의 핵심으로 부각하고 있는 실정이다. 그러나 수소 이용 역시 궁극

적으로는 NOx 배출 문제를 고려한다면 순산소 연소기술 하에서 문 제가 접근되어야 한다는 것이 연소 연구자들에게는 가장 큰 고민이 고 중요한 문제이기도 하다. 순산소 연소 기술 개발에서 가장 중요 하게 다루어져야 할 문제가 극단적 고온으로 인한 연소기 재질 문 제의 해결이며 이는 당분간 해결하기가 쉽지 않기 때문에 고속 분 사 등을 통한 화염 부상에 맞추어 연소기 설계와 운전 범위를 정해 야 하는 문제와 화염 부상에 따른 화염의 연소 불안정 문제가 항상 상존하게 된다. 이러한 문제는 향후 미래 연소 기술에 있어서도 중 요한 문제로 인식되기 때문에 많은 연구자들이 관심을 갖는 부분이 기도 하다. 부상 화염의 경우 많은 실험적 데이터가 주어져 있음에 도 불구하고 부상 화염 선단의 화염 특성에 대해서는 지난 20여년 간 많은 연구들이 있었고 최근 층류 화염이든 난류 화염이든 부상 화염의 안정화 기구는 에지화염 (edge flame)으로 밝혀지면서 90년 대 이후 에지 화염 거동에 관한 연구는 관심의 대상이었다.

화염은 예혼합화염 (premixed flame)과 비예혼합 또는 확산화염 (non-premixed or diffusion flame)으로 분류할 수 있고 층류와 난 류 화염으로 특성 지어진다. 예혼합 화염에서는 화학반응이 일어나 기 전에 연료와 산화제가 분자 수준에서 혼합이 이루어져 점화를 통해 화염이 전파하게 되면 화학 반응 특성에 의해 화염 전파 속도 와 같은 화염 특성이 결정되게 된다. 반면에 비예혼합화염에서는 연료와 산화제가 분리된 상태에서 공급되고 연료와 산화제가 경계 혼합이 이루어지게 되면 화염 면은 당량혼합비선 면에서 (stoichiometric line)을 따라 형성되는 것으로 이해된다. 문제는 에 지 화염이 예혼합 화염도 확산화염도 아닌 부분예혼합 화염 (partially premixed flame)이어서 특성 파악이 쉽지 않다는데 있다. 지금까지 200여편의 논문이 국제 학술지에 발표되었지만 여전히 특 성 파악이 여의치 않는 화염으로 인식된다. 확산 화염 및 예혼합화 염의 진동 불안정에 대해서는 약 20여년간 이미 많은 연구들이 발 표되어, 주요한 연구 결과는 화염으로부터 열손실이 화염 진동을 일으키는 임계 Lewis 수를 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다. 이 러한 결과들은 결국 화염 소화한계가 S-curve의 upper branch에서 1D NSP (neutral stable point)가 존재함을 의미함을 간파하여야 한 다. 반면에 에지화염은 점화파 (ignition wave) 혹은 실패파 (failure wave)이거나 정지 화염일 수도 있었고, 주로 화염 구멍 (flame hole), 부상 화염, 연료베드 위에서의 화염 퍼짐, 2차원 혼합층에서 의 점화 화염 그리고 촛불 등에서 다루어져 왔다. 그러나 일차원 화염에서와 마찬가지로 에지 화염은 열손실이 크다면 Lewis 수가 1 인 경우에도 진동 불안정성이 나타난다는 것을 최근 연구 결과들은

보여주고 있다. 결국 이러한 연구 결과들은 1D NSP (neutral stable point) 이외에도 실제 소화점은 S-curve의 상부가지(upper branch) 내에서 2D NSP가 존재한다는 것을 보여준다는 점에서 관심이 대 상이며 많은 연구가 요구되는 부분이기도 하다.

1.2 연구목적 및 내용 TIONAL

화염 구멍 (flame hole)과 화염 디스크 (flame disk) 특성에 관한 연구는 S-curve의 중간가지 (middle branch)거동을 이해하기 위한 열쇠이다.[1-3] 이러한 관점에서 화염 구멍과 원형 화염에 관한 연 구들은 주로 화염 구멍을 통해서 소화파 (extinction wave)에 대한 화염전파 특성을, 원형 화염를 통해서는 점화파 (ignition wave)의 화염전파 특성을 이해하고자 하였다. 한편, 소화와 점화에 관한 연 구들은 대부분 고신장율 화염에서 화염 구멍의 동적 거동 특성을 이해하려는 연구들이 주류를 이루고 있다.

에지화염 (edge flame) 혹은 부분 예혼합 화염 (partially premixed flame)은 층류와 난류의 비예혼합화염 (non-premixed

flame)에서 나타날 수 있고 예혼합 화염과 확산화염의 중간범주에 속한다. 그리고 부분예혼합화염은 화염 구멍 (flame hole) [4,5], 부 상화염 (lifted flame)[6-8], 연료베드 (fuel bed) 에서의 전과하는 화 염[9], 2차원 혼합층에서의 점화 화염 (ignited flame)[10] 등에서 관 찰되었다. Fig 1.1은 혼합층에서 에지화염의 개략적인 구성을 나타 내고 있다. 부분예혼합화염는 당량비가 1인 지점 혹은 전파속도가 최대인 점을 따라서 전파하며, 흥미로운 점은 전파속도는 양의 값 을 가지면 미연가스로 전파하는 점화파 (ignition wave), 음의 값을 갖게 되면 기연가스로 퇴각하는 후퇴파 (retreating wave)가 나타나 는 특징을 갖는다. 많은 연구자들이 다양한 시도를 통하여 부분예 혼합화염의 거동특성들을 파악해 왔다. 실험과 수치해석의 연구들



Fig. 1.1 Characteristics of triple(or edge) flame in mixing layer

[10-13]에서 전파속도는 측면의 혼합 농도장의 구배, 화염의 곡률 (flame curvature), 횡방향의 연료유동속도 등에 의존함을 보여 왔 다. 또한 에지화염은 소화한계 부근에서 연료 루이스 (Le_f)수, 복사 열손실 그리고 반경 방향의 열손실에 따라 화염 진동이 발생하게 된다.[14-16]

에지화염의 거동특성에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 연구 가 이루어지고 있다. Ruetsch 등[13]은 에지화염 전파속도가 혼합분 율 (mixture fraction)의 구배가 증가할수록 감소하는 것을 보고하였 고, 큰 값의 혼합층 두께 (mixing layer thickness)를 갖는 조건에서 화염전파속도를 (pu/pb)^{1/2}의 함수로서 표현하였다. Im과 Chen[4]은 직접수치모사를 통해 수소-공기 확산화염에서 인위적인 와동 (rotational vortex)을 형성하여 스칼라 소산률 (scalar dissipation rate)과 화염곡률의 함수로서 화염변위속도의 특성을 연구한 바 있 다. Cha와 Ronney[17]는 대향류 슬롯-젯 (counterflow slot-jet) 버너 에서 에지화염의 전파특성을 체계적으로 연구하였다. 그들의 연구 에서 음의 화염전파속도가 존재함을 규명한 바 있다.

화염불안정성은 산화제나 연료측의 1보다 큰 루이스 수 (Lewis number)에서 발생하며 화염대로부터 용적열손실 (volumetric heat loss)은 진동불안정성을 유발하는 임계 루이스 수를 감소시키는 것 으로 알려져 있다.[1,18] 기존 연구에서 화염으로부터 열손실이 큰 경우에는 루이스 수가 1인 경우에도 진동 불안정성이 나타날 수 있 음을 보고하였고, 특히 에지화염을 통해 나타나는 진동 불안정성의 시작 조건 (onset condition)은 혼합강도 (mixture strength), 유동속 도, 복사열손실에 의해 영향을 받게 된다.[18,19] Buckmaster와 Zhang[20]에 의하면 1차원 화염의 S-curve의 상부가지 (upper branch)에서 정상상태의 소화 (quenching) 조건에 도달하기 전 1D NSP (1 dimensional neutral stable point)에서 이미 화염 소화는 진 행될 수 있음을 확인하였고, Park 등의 연구는 2차원 화염에 대한 실협과 계산을 통해 1D NSP보다도 더 높은 담젤러 수 (Damköhler number)에서 2D NSP가 위치할 수 있음을 보였다는 측면에서 본 연구의 중요성을 인식할 수 있다.

한편, 대향류 화염 구조에서 Santoro 등[21]은 소화 담켈러 수 근 처에서 약한 섭동 (perturbation)을 이용하여 화염구멍 (flame hole) 의 전체 과정 (화염 구멍의 생성, 성장, 복원)을 잘 묘사하였고, Shay와 Ronney[22]는 축 기준으로 기울여진 대향류 버너에서 국부 적으로 의도된 신장율을 갖는 에지화염에 대해 연구하였다. 이와 같이 대향류 확산 화염 형상에서 에지화염의 거동과 화염 불안정성 에 대한 몇 가지 실험 및 수치 해석적 연구들이 보고되었지 만,[22-25] 이들 연구들 역시 대부분 고신장율 영역에서의 연구 결과이다.

Maruta 등[26]의 미소중력장 실험에서 저신장율 확산화염의 소 화는 복사열손실에 기인한다고 보고 하였다. 일반적으로 대향류 화 염에서는 정체점 근처에서 유효한 상사 개념 (similarity concept)을 도입함으로써 정체점 근처에서 화염 면에 수직한 방향으로 일차원 화염 구조를 갖게 된다. 따라서 대향류 화염에서 화염의 크기가 매 우 큰 경우에는 중심부에 해당하는 정체점 근처는 반경 방향으로의 측면 열손실이 중심부에 영향을 미치지 않기 때문에 상사 개념에 근거한 일차원 화염으로 간주할 수 있다. 그러나 화염 크기가 작게 되어 상사개념이 유효한 정체점 근처의 화염 중심부가 측면 열손실 에 노출되게 되면 더 이상 일차원 화염으로 볼 수 없으며, 미소 중 력 화염에서는 측면 방향으로의 측면 열손실 그리고 정상 중력장에 서는 측면방향으로의 전도 열손실과 부력에 의한 버너 림 (burner rim)으로의 대류 열손실 등 다차원 효과 (multi-dimensional effects) 가 중요하게 된다. Park 등[27,28]은 실험과 2차원 수치계산을 통하 여 저신장율과 고신장율 대향류 확산화염의 소화거동에 대한 차이 를 확인하였는데, 고신장율 화염에서의 화염소화거동은 화염의 중 심으로부터 소화가 일어나기 시작하여 전체적으로 빠른 시간으로

소화되고, 화염크기가 버너직경보다 작은 저신장을 화염에서의 화 염소화는 화염크기가 감소함과 동시에 화염의 외부로부터 중심부 쪽으로 소화가 일어난다고 보고하였다. 이러한 저신장를 화염에서 비정상 상태의 소화현상을 수축하는 화염 디스크 (shrinking flame disk)로 정의할 수 있고, 또한 이 현상은 화염소화를 포함한 저신장 율 화염거동이 다차원 효과의 영향이라는 결정적인 단서가 된다. 또한 Fig.1.2에서 보는 바와 같이 화염 에자의 농도장의 구성이 부 분 예혼합 화염의 형상과 같다. 저신장을 대향류 화염의 화염 디스 크에서의 화염거동은 측면방향의 열손실 (lateral heat loss), 연료의 루이스 수 (Le_i), 화염복사를 포함한 에지화염 외부의 국소신장율 (local strain rate)에 영향을 받는 복잡한 현상으로 나타난다. 정상



Fig.1.2 Low strain rate counterflow configuration.

중력장에서의 부력효과는 외곽 에지화염 (outer edge flame)의 국부 화염신장율의 증가와 버너림으로의 측면열손실의 증가가 상반된 결 과로 나타난다. 전자는 C-curve 거동 특성상의 저신장율 화염에서 의 화염강도를 증가시키는 반면 후자는 화염강도를 약화시킨다. 이 전의 연구 결과[27]로부터 유추해 보면, 전체신장율 (global strain rate)의 증가는 에지화염 진동을 억제하고, 측면방향 열손실의 증가 는 에지화염 진동에서의 임계 연료 루이스수를 낮춘다. 후자의 결 과는 적절한 열손실이 존재하면 연료 루이스수가 1보다 작을지라도 에지화염 진동을 일으킬 수 있다는 이전의 결과와 일치한다.

최근 Park 등[28]은 높은 전체신장율과 낮은 전체신장율에서 대 향류 확산 화염의 소화거동을 실험적 연구 그리고 2차원 직접수치 모사 (DNS)를 통해 규명한 바 있다. 수치해석을 통해 저신장율 화 염소화는 복사 열손실뿐만 아니라 반경방향의 전도 열손실이 소화 에 영향을 미친다는 것을 확인하고, 저신장율 화염의 길이가 반경 방향의 전도 열손실의 척도임을 밝힌바 있다. 그 결과로서 저신장 율 화염의 소화조건 근처에서 여러 형태의 에지화염의 진동이 관찰 되었고, 저신장율 화염의 진동불안정성은 복사 열손실뿐만 아니라 화염 반경 방향의 전도 열손실이 주요한 불안정성 생성 메커니즘이 된다. 또한 저신장율 화염소화 근처에서 나타나는 에지화염의 진동 불안정성 시작조건과 화염진동모드에 대해 구체적으로 제시하였고, 특히 실험적으로 보고된 바 없는 소화직전의 화염 성장모드가 나타 남을 제시하였다. Yun 등[29]은 2차원 직접수치모사 (DNS)를 통해 0g와 1g의 조건에서 모두 저신장율 화염의 불안정성 매커니즘인 반 경방향의 전도열손실에 의한 에지화염 진동을 제시한바 있다. 이는 무중력조건에서도 일반중력조건과 동일하게 반경방향의 전도열손실 이 존재한다는 결정적인 단서를 제공한 것이다.

지금까지의 저신장율 화염과 관련된 기존의 연구에서는 상대적으 로 물리적 설명과 근거들이 부족하다고 볼 수 있기 때문에 본 연구 에서는 저신장율 대향류 확산화염의 소화 거동특성에 대한 물리적 근거들을 이끌어 내고자 한다. 이와 더불어 저신장율과 고신장율 화염의 천이영역이 존재할 것으로 판단이 되고 이에 따른 실험적 연구 결과를 도출하고자 한다. 또한 전체 화염신장율 (global strain rate), 속도비 (velocity ratio), 장막유동의 유량변화 그리고 버너직 경의 변화에 따른 실험에서 에지화염 진동 영역을 포함한 C-curve 을 제시하여 저신장율과 고신장율 화염의 거동특성과 반경방향의 전도 열손실이 어떻게 존재하는지와 화염구멍 (flame hole)과 수축 하는 화염디스크 (shrinking flame disk) 특성을 밝히고자 한다.

제 Ⅱ 장 이론적 고찰

2-1 대향류 확산화염

난류 화염의 순간 구조는 층류화염으로 되어 있고 평균 구조는 층류 화염들의 앙상블로 되어 있으며, 화염대의 두께는 난류의 최 소 크기인 콜모고로프[30]의 크기보다 작아 화염대 내에 난류 생성 을 허용하지 않는다. 그러므로 1984년 Peters에 의해 개념이 완성된 층류 화염편 개념 (flamelet model)[31]은 유동장과 화학반응을 분 리 (de-couple)할 수 있는 유일한 개념이기 때문에 현재까지 화염 해석 연구에 주류를 이루고 있다. 또한, 층류 화염편 모델은 난류 화염의 앙상블 평균을 위해 화염 구조가 체계적으로 연구된 기초 연소장으로부터 정보를 제공받아야 하기 때문에 제트 화염과 혼합 층의 상사성과 더불어 1차원 화염 구조를 갖고 있는 대향류 화염에 대한 연구는 층류 화염편 개념에 대한 연구와 더불어 약 50여 년간 활발한 연구 주제가 되었다.[32] 대향류 화염은 상사 (similarity) 변 수를 이용하여 1차원 화염으로 간단히 모델링 할 수 있어 화염구조 와 소화거동에 대해 잘 정의된 데이터 제공이 가능하며, 난류화염 의 국소구조인 화염편 (flamelet)에 대한 유용한 정보를 제공해 준 다.[32-35] 대향류 확산화염 연구는 1950년 Spalding에 의해 다공질 구 형상의 버너에서 정체점 (stagnation point) 근처의 화염을 대상 으로 시작되어, Tsuii 연구그룹[32]에서 1960년대부터 이 분야에 기 여를 하여 많은 데이터베이스를 구축하였다고 해도 과언은 아니다. 특히 정상 대향류 화염에서는 화염이 공간상에 정지하고 있기 때문 에 화염스트레치가 화염 곡률 항이 사라지고 화염면에 접선방향의 유동속도 구배로 표현되며, 정상상태 비압축성 유동을 가정하는 경 우 연속 방정식으로부터 접선방향 속도 구배는 축방향 속보구배로 표현할 수 있어 출구에서의 속도 증가에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 갖고 있다. 또한 Chelliah 등[36]에 의해 전체신장률의 식이 제시되어 양측 노즐의 경계조건이 고정되면 화염 구조는 화염신장 률에 의해 지배를 받게 된다. 신장률은 유동의 변화를 대표하는 인 자로 화염대 (reaction zone)에서 반응물 (reactants) 체류시간의 역 수와 비례하며, 특히 확산화염의 경우 연료와 산화제의 확산이 중 요해지는 영역인 혼합층의 두께 (mixing layer thickness)에 영향을 주는 인자이다.

대향류 확산화염에서는 산화제 측과 연료 측의 질량 유속이 균형 을 이루는 위치에서 화염이 존재하며, 일반적으로 연료 측을 과다 하게 희석한 경우를 제외하고는 화염은 산화제 측에 형성된다.

신장률은 노즐 출구 유속과 정비례하는 관계에 있으며, 노즐출구 의 산화제와 연료류의 유속 (V_a, V_f), 산화제와 연료 노즐 양단간의 거리(L), 연료와 산화제의 밀도 (ρ_f, ρ_a)의 함수이다. 본 실험에 사용 된 전체 화염 신장률 (a_g)은 Chelliah 등[36]이 제안한 식을 수정하 여 다음과 같이 정의 된다.

여기서, *v*,은 연료와 산화제 측 버너 노즐 출구에서의 속도비 (velocity ratio)를 의미한다. *v*와 ρ는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내고, *L*은 버너 노즐 간 거리를 나타내며, 아래첨자 *f* 와 *a*는 각각 연료와 산화제를 의미한다.

 $(1+Vr\frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{r}}), Vr=-$

(2-1)

2-2 S-curve 거동 특성

대향류 화염의 경우 신장률은 스칼라 소산률에 비례하여 일대일 대

응관계 (one-to-one correspondence)에 있고 스칼라 소산률은 혼합 층 내 반응물의 농도와 관련되는 혼합분율 구배의 제곱에 비례한 다. 따라서 층류 화염편 모델 적용에 필요한 스칼라 소산률의 값은 신장률로부터 바로 알 수 있기 때문에 대향류 화염에서 화염 소화 한계 등을 정량화할 수 있게 된다.

Figure 2.1(a)는 혼합분율 (mixture fraction)에 따른 화염의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 이론적으로는 산화제가 이론 혼합비를 이 루는 당량혼합비 조건 (Zst)에서 화염 최고 온도가 나타나야 하겠지 만, 실제의 경우 연료 과잉 쪽으로 약간 이동한 지점에서 화염의 최고 온도가 나타난다. 또한 신장률이 증가할수록 화염 최고 온도 의 위치가 연료 과잉 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. Fig. 2.1(b)는 신 장률 (또는 스칼라 소산률)에 따른 화염 최고온도의 변화를 개념적 으로 도시한 것이며, Fig. 2.2은 Nanduri[37]에 의해 제안된 담켈러 수 (Damköhler number)를 기준으로 한 화염 최고온도의 변화를 보 여주는 S-curve 이다. S-curve는 높은 온도에서 신장률이 증가함에 따라 소화에 이르는 상부분기 (upper branch), 점화 현상과 관련 있 는 하부분기 (lower branch), 점화와 소화 사이의 중간분기 (middle branch)로 나눌 수 있으며, 중간분기는 수치적인 해는 존재하나 정 상 상태에서는 얻을 수 없고 비정상 상태에서 나타나는 불안정한 영역이다. 화염의 소화는 매우 낮은 신장률 하에서 복사 열손실 (radiative heat loss)에 의해 발생하기도 하지만, 보통은 S-curve의 상부분기에서 신장률이 증가함에 따라 화염의 온도가 낮아지며 일 어나게 된다.



Fig. 2.1 (a) Schematic representation of temperature as a function of Z, (b) S-curve of maximum flame temperature with strain rate or scalar dissipation rate.



제 Ⅲ장 실험장치 및 방법

이 장에서는 본 연구에 사용된 실험 장치에 대한 구성과 각 부분의 기능을 살펴보고, 실험방법에 대한 설명을 논의하도록 한다.



Fig. 3.1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems

3.1 실험장치

Figure 3.1은 실험에 사용된 대향류버너와 유로계시스템에 대한 개략도이다. 본 실험 장치는 대향류 버너부, 화염온도 측정 및 저장 장치, 화염변위측정과 화염 소화특성을 파악하기 위한 카메라장치, 유량의 제어와 화상을 저장하기 위한 컴퓨터, 대향류 버너의 냉각 을 위한 냉각수 장치 그리고 각종 가스의 정량 공급을 위한 질량유 량 제어장치로 구성되어진다.

3.1.1 대향류 버너

Figure 3.2는 본 실험에 사용된 실험장치의 실제 이미지를 보여주 고 있다. 사진에서 보여주는 바와 같이 스테인리스 스틸 (stainless steel)로 제작된 대향류 버너는 아크릴로 제작된 밀폐된 공간에 설 치하였으며, 버너의 내경은 18, 26, 그리고 46mm 로 변화를 주며 실험하였다. 대향류 화염에서의 화염대는 산화제 측에 형성되는데, 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서 공급하였고, 산화제는 하부노즐에서 공급하여 실험하였다. 또한 유



Fig. 3.2 Experimental apparatus of counterflow burner



Fig. 3.3 Nozzle exit velocity with radial distance across burner nozzle for burner diameter 18, 26 and 46mm

동 자체에서 일어나는 부력의 효과를 최대한 배재하기 위해 상대적 으로 낮은 밀도의 연료혼합물을 상부 노즐에서 분사하였다. 각 노 즐 내부에는 미세한 매쉬 스크린 (mesh screen)을 다단으로 설치하 여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였고 이를 Fig. 3.3과 같이 마이크로 마노미터를 이용하여 검증하였다.

3.1.2 상부버너 냉각수 순환장치와 하부버너의 장막유동

화염면으로부터 복사열전달에 의한 노즐의 과열 방지와 온도 경 계조건의 유지를 위해 상부버너에 냉각수를 순환시켰다. 냉각수를 순환시키기 위한 냉각장치로서 상온의 물이 전기 모터로 강제 순환 되어 냉매 측의 라디에이터를 통과하면서 열 교환되어 냉각된다. 냉각된 물은 냉각수 저장탱크에 저장하여 냉각수의 온도가 일정하 게 유지되도록 하였다. 냉각수의 온도는 제어기에 의한 온도 세팅 으로 자동 제어된다. 또한 연소 후 발생되는 배기가스와 질소가 쌓 이는 것을 방지하기 위해 진공 펌프를 통해 외부로 배출시켰으며, 진공펌프의 맥동이 화염에 영향을 주지 않게 하기 위하여 버너 상 부에 설치하지 않고 버너로부터 멀리 떨어진 곳에 설치하여 배출시 켰다. 대향류 버너 화염은 미세한 충격에도 영향을 받기 때문에 주 위류의 영향을 최대한 받지 않도록 하였다. 외부로부터의 화염 교 란을 막고 후류 (wake flow)에 의해 유지되는 외측 화염을 제거하 기 위해 질소를 위한 장막 유동 (curtain flow)을 하부 버너의 외측 노즐에서 분사하여 실험하였다.

3.1.3. 질량유량 제어기

본 실험에 사용된 연료는 99.95%의 고순도 메탄 (CH4)를 사용하 였으며, 희석제로는 일발순도 질소 (99.95%)를 사용하였다. 또한 산 화제로 고순도 (zero grade) 공기를 사용하였다. 대향류 버너로 공 급되는 연료 및 산화제를 비롯한 모든 유체는 절량 유량제어기 (Mass Flow Controller, Bronkhost 사)를 통해 제어되며, 질량유량 제어기를 제어하는 장치 (Read-out Box, CDS사)는 컴퓨터를 통해 조절할 수 있도록 하였다. 질량유량 제어기는 최대 사용량의 약 ±1%의 정확도를 가지고 있다. 최저 사용량과 최대 사용량 사이에 서의 입력 값에 대한 실제 유량이 선형성 (linearity)를 나타내는지 확인하기 위하여 유량검정을 실시하였다. 유량검정은 버블미터 (Bubble meter)를 이용하였고, 기포를 띄워 기포가 일정한 구간을 이동한 시간을 측정하여 유량으로 환산하였다. 측정된 실제 유량 값을 유량조절 프로그램에 입력하여 입력 값과 실제 유량 값이 일 치하도록 보정 (calibration)하였다.

모든 실험은 전체신장률 (Global Strain Rate)을 일정하게 유지시 키면서 희석제의 공급 유량을 증가시키면서 실험하였고, 유량의 제 어는 유량조절 프로그램을 통해 자동 제어되도록 하였다. 화염소화 에서 임계 몰분율의 측정은 소프트웨어를 이용하여 전체화염신장율 을 고정시키고 희석제 몰분율을 증가시키면서 화염 소화가 나타나 는 조건을 찾음으로써 얻을 수 있다.

3.2 실험방법

3.2.1 대향류 화염의 소화특성 가시화

저 신장율 화염과 고신장율 화염의 영역을 확인하기 위해 디지털 미디어 카메라 (HDV 1080i, SONY사)와 고속카메라 (Phantom v7.2)를 이용하였다. 진동하는 화염의 거동을 관찰하기 위하여 화염 정면에서 디지털 미디어 카메로로 촬영 (30 frame)하였고, 화염구멍 을 통한 화염 소화과정을 관찰하기 위해 상부에서 고속카메라 (60 frame)를 이용하여 화염 거동을 관찰하였다. 고속카메라의 경우, frame 수를 높일 경우 노출 시간이 상대적으로 작아지기 때문에 60frame의 제한이 있었으며 이를 image processing을 통하여 화염 SNIVE 이미지를 취득하였다.

3.2.2. 화염분석을 위한 Matlab 기법

디지털 미디어를 통해 동적거동을 갖는 에지화염이 저장된 동영 상은 상용소프트웨어 (Adobe Premiere Pro ver. 7.0)를 이용해 시분 할 하였다. 상용소프트웨어를 통해 시분할 된 이미지는 1초에 30 frame의 파일 (720 × 480 pixel, IPG)이 획득된다. 이 이미지 파일 은 Matlab 가반으로 분석하면 720×480×3 (X×Y×n) 크기의 매트릭스 (matrix) 형태를 취하게 된다. 여기서 3(n)은 720×480의 매트릭스가 Red, Green, Blue의 3색의 강도 (intensity)를 규정짓는 각각의 매트 릭스를 의미한다. 즉, 1개의 화소 (pixel)는 1×1×3의 매트릭스로 표 현된다. 이러한 매트릭스로 구성된 데이터에서 빛의 발광강도 (luminance intensity)의 정보를 추출하여 화염길이를 측정하게 된 다. 단위 화소 (pixel)당 발광강도를 구하는 식[38]은 3.1과 같다.

Y (Luminance Intensity) = $(0.3 \times \text{Red}) + (0.59 \times \text{Green}) + (0.11 \times \text{Blue})$ (3.1)

SNIVE

GNATION

3.2.3 실험 조건

앞서 언급된 대향류버너는 외부에 교란되는 화염을 제거할 수 있 는 구조로 제작되었다. 버너 직경은 18, 26 그리고 46 mm의 세가지 경우에 대해, 버너 노즐간의 간격은 15.0 mm로 고정하였고, 버너 직경 46 mm의 대해서는 버너 노즐간의 거리 20 mm로 변경하여 재 차 실험을 수행하였다. 또한 화염외곽의 국부신장율 변화를 관찰하 기 위해 18 mm의 노즐직경의 대향류버너를 이용하여 장막유동 체 적유향을 4, 8 그리고 12 l/min으로 변화를 주며 실험을 하였다. 다차원적 효과를 명확히 하기 위해 속도비와 전체신장율을 변화 시키면서 실험을 수행하였다. 속도비의 범위는 1에서 5, 전체 신장 율의 범위는12에서 100 s⁻¹이다. 전체 화염신장율의 정의는 다음과 같다.[35]

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + Vr \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}}\right), \quad Vr = \frac{V_f}{V_a} \tag{3.2}$$

여기서 Vr는 속도비, V와 p는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내 며, L은 노즐간의 거리, 하첨자 f와 a는 각각 연료와 산화제를 나타 낸다. 본 실험에서는 혼합층두께 (1.49 mm)와 부력에 의한 대류 속 도 (l = 15 mm 경우 8.13 cm/s, l = 20 mm 경우 9.40 cm/s)를 평가 하였고[39] 위의 값을 기준으로 실험에 영향을 주지 않는 범위내에 서 실험을 수행하였다. 그 정의는 다음과 같다.

Mixing Length Thickness :
$$l = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{a_g}}$$
 (3.3)

Buoyant Convection Velocity :
$$V_b = \sqrt{\frac{gl}{2}}$$
 (3.4)

여기서 α는 열확산계수, ag는 전체화염신장율, g는 중력가속도, 그 리고 *l*은 버너간의 거리를 나타낸다.


제 Ⅳ장 실험결과 및 고찰

IONA

4.1. 장막유동 유량 변화에 따른 효과

4.1.1 결과 및 논의

본 실험에 사용된 대향류 버너의 상부 버너에는 연료와 질소를 혼합하여 공급하고, 하부버너에는 산화제를 공급하였다. 질소는 소 화조건 근처에서의 연료측 혼합물의 몰분율에서 루이스수를 1보다 낮게 할 수 있어 과도한 열손실에 의한 불안정성을 유발하게 되며, 화염불안정성에 의한 진동이 발생하면 화염 열손실에 대한 효과를 명확히 할 수 있다. 대향류 화염에서는 서로 반대로 흐르는 유동이 충돌하여 정체점 (stagnation point) 근처에서 화염이 형성되며, 이 지점은 수학적으로 1차원 상사성 (similarity)을 갖는다. 이때 상부 버너에 공급되는 연료에 질소를 지속적으로 공급하게 되면 화염이 불안정해지게 되며, 결국 소화한계에 달하게 되면 화염이 소화하게 된다. 화염이 소화될 때 전체신장율에 따라 임계 질소몰분율 (critical N₂ mole fraction)을 도시한 것이 화염소화한계선도 (C-curve)이다.

Figure 4.1과 4.2는 각각 전제 화염 신장율에 따른 속도비 (a) 3, (b) 4, (c) 5와 장막유동유량 (a) 4 *l/min*, (b) 8 *l/min*, (c) 12 *l/min* 에서 화염소화한계 그래프이다. Maruta 등[26]은 유한한 버너 직경 을 가지고 수행된 실험에서 1차원적 화염특성은 복사열손실에 의해 C-curve 형태로 화염소화가 나타남을 규명하고, Oh 등[40]과 Yun 등[29]은 2차원 수치해석을 통하여 측면 열손실 또한 C-curve에 기 여한다고 규명한 바 있다. 본 실험에서도 전체신장율에 따른 화염 소화 거동은 C-curve의 형태를 따른다. 모든 고신장율 화염조건에 서 복사 열손실과 부력효과를 무시할 수 있기 때문에 화염소화 임 계 질소몰분율은 고신장율에서 하나의 곡선으로 일치한다. Fig. 4.1 에서 장막유동의 속도변화는 화염외곽에 국부신장율을 증가시키는 효과로 화염소화 임계몰분율에 영향을 줄 것으로 판단되나 본 실험 에서는 크게 영향을 주지 않았다. 그리고 Fig. 4.2 저신장율 소화화 염에서 속도비 증가는 화염 소화의 임계 몰분율을 감소하게 한다. 이 부분에 대해서는 소화점 부근에서 반경방향의 평균화염길이의 그래프를 살펴보고 다시 논의하겠다.



(c)

Fig. 4.1 Variation of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate in terms of curtain flowrate at the velocity ratio of (a) 3, (b) 4, (c) 5



(c)

Fig. 4.2 Variation of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate in terms of velocity ratio at the curtain flowrate of (a) 4, (b) 8, (c) 12 *l/min*.

curtain flow-rate		4 l/min	8 l/min	12 <i>l/min</i>	
		$a_{g, s}^{-1}$			
Vr=3	Oscillation extinction	-25	-25	-25	
	Shrinking extinction	30-40	30-40	30-40	
	Flame hole extinction	45-	45-	45-	
Vr=4	Oscillation extinction	-30	-30	-30	
	Shrinking extinction	35-50	35-50	35-50	
	Flame hole extinction	55-	55-	55-	
Vr=5	Oscillation extinction	-30	-30	-30	
	Shrinking extinction	35-70	35-70	35-70	
	Flame hole extinction	75-	75-	75-	
	\$ 3	CH QL	III		

Table 4.1 Divisions of extinction mode

Table 4.1에서 각 조건에서 전체신장율에 따른 화염소화 모드를 나타내고 있다. Table에서 나타나듯이 장막유동 유량의 변화에 따라 서는 효과가 나타나지 않았고 속도비에 대한 효과가 두드러지게 나 타나는 것을 볼 수 있다.

이전 Park등[12]의 연구에서 반경 방향의 전도열손실은 식 (4.1)에 나타낸 바와 같이 화염반경과 반비례함을 보였다.

$$q_r = k \frac{\partial T}{\partial r} \sim \frac{1}{l_f} \tag{4.1}$$

여기서 lf는 반경 방향의 화염길이이다. Fig. 4.3은 속도비가 (a) 3, (b) 4, (c) 5일 때의 장막유동속도 조건에 따른 평균화염반경을 나타 내고 있다. Fig. 4.3에 보인 바와 같이 Vr = 3에서는 장막유동의 속 도 변화가 화염반경 변화에 거의 영향을 주지 않았다. 그러나 Vr = 4와 Vr = 5의 조건에서는 장막유동의 속도가 증가함에 따라 화염 반경은 미소하게 증가한다. 이것은 저신장율화염에서 장막유동의 속도 증가는 국부스트레인율을 증가시키고 식 (4.1)을 토대로 상대 적으로 장막유동속도가 증가는 반경방향의 전도열손실 억제시킨다 는 것으로 해석된다. 위의 근거로 장막유동속도가 증가된다면 화염 소화 임계몰분율은 상대적으로 높게 나타나야 하나 변화가 없는 점 에 대해서는 차후 에지변위속도의 결과를 보면서 논의하도록 하겠 다. 반면 고신장율에서는 화염의 외측으로부터 질소 유동을 유도하 므로 반응에 참여하는 반응화학종의 농도의 감소를 통해 화염강도 가 감소할 것으로 예상되지만 본 실험에서는 고신장율 확산화염에 서는 장막유동의 속도변화가 크게 영향을 주지 못했다. 그리고 고 신장율 확산화염에서 화염소화는 화염구멍을 통해 시작되므로



(c)

Fig.4.3 Variation of mean flame radius with global strain rate in terms of curtain flowrate at the velocity ration of (a) 3, (b) 4, (c) 5.



(c)

Fig. 4.4 Variation of mean flame radius with global strain rate in terms of velocity ratio at the curtain flowrate of (a) 4 *l/min*, (b) 8 *l/min*, (c) 12 *l/min*.

소화지점에서도 장막유동의 속도변화는 거의 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다.

Figure 4.4에서는 장막유동 (a) 4 *l/min*, (b) 8 *l/min*, (c) 12 *l/min*일 때의 속도비 조건에 따른 평균화염반경을 나타내고 있다. 화염 반 경은 전체신장율의 증가에 따라 증가하고 속도비의 증가에 따라 감 소한다. 이는 식 (4.1)을 토대로 살펴보면, 속도비의 변화가 화염반 경에 영향을 주고 반경방향의 전도열손실에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. Table 4.1에서도 살펴보면 속도비가 증가함에 따라 각 소화모드가 고신장율 영역으로 확장된 것을 볼 수 있다. 이는 속도 비의 변화에 따른 영향이 에지화염진동과 화염소화에 직접적인 영 향을 주고 있다는 것을 의미한다.

저신장율화염에서 시간에 따른 디스크화염 반경 변화를 Fig. 4.5 에 나타내었다. 에지진동모드의 화염은 팽창과 수축을 하는 동안 소화점에 도달할수록 가속화되는 것을 보여준다. 그리고 마지막 수 축되는 소화직전의 후퇴파 곡선과 그 외의 다른 후퇴파 곡선은 상 당한 차이점을 보인다. 이것은 마지막 수축되는 소화직전의 화염이 더 이상 지탱할 수 없음을 나타낸다.



(c)

Fig. 4.5 (a) Temporal variation of flame disk radius, (b) its temporal variation during the expanding flame period, and (c) that during the shrinking flame period; $a_g = 15 \text{ s}^{-1}$, Vr = 4, X_{N2} = 0.639 and Curtain flow-rate = 8 l/min

Figure 4.6은 소화직전의 마지막 단계에서 $a_g = 15 s^{-1}$, Vr = 4 조 건에서 장막유동의 속도변화에 따른 팽창과 수축의 디스크화염 에 지 변위속도를 비교한다. 화염이 정체면 (Stagnation plane)에 위치 하면, 에지 화염 전파속도는 아래의 식으로 표현된다.

$$V_f = \frac{dr_f}{dt} - ar_f \tag{4.2}$$

여기서 a는 화염 외부에서의 국부 신장율을 말하므로 ar_f는 가스 유 동속도를 말한다. 그러나 실제 화염은 정체면에 위치하지 않기 때 문에 에지 화염 전파속도는 다음의 식으로 수정되어야 한다.

$$V_f = \frac{dr_f}{dt} - Car_f \tag{4.3}$$

C는 화염의 위치, 전체신장율, 속도비, 장막유동에 의존한다. 본 실 험에서 C는 정체면에서 반경방향 속도와 화염면에서 반경방향 속도 는 근사한 값을 가지므로 C는 1로 근사할 수 있다. 또한, 가스유동 속도의 크기는 0 (10) cm/s 이고, Fig. 4.6에서 보이는 것처럼 모든 에지 변위 속도는 0 (10) mm/s이다. 그러므로 에지 화염 전파속도는 팽창 화염기간 동안조차에서도 음의 값을 갖는다는 것을 알 수 있 다. 또한 에지화염 변위속도의 결과에서 화염안정화의 척도가 되는 화염반경은 0의 에지화염 변위속도를 갖기 위해서는 매우 커져야만 한다. 즉, 가스의 유동속도 범위가 수십 *cm/s* 범위이고, 실험에서 얻 어진 에지화염 변위속도의 값은 수십 *mm/s* 범위이기 때문에 정지 화염 (stationary flame)을 갖기 위해서는 화염반경이 매우 커져야만 함을 의미한다.

앞서 언급했듯이, 장막유동의 속도가 증가할수록 안정화되는 화 염반경에 도달하였고, Fig. 4.6에서 나타나듯이 장막유동의 속도 증 가로 인하여 에지 변위 속도가 증가함을 보였다. 이것은 장막 유동 속도를 증가시키면 에지변위속도 증가를 통해 알 수 있지만 화염 불안정성은 증가하여야 하나 국부 신장율의 증가에 따른 화염강도 의 강화 그리고 화염 반경 증가를 통한 열손실 감소를 통해 화염안 정화에 기여하는 상반된 효과로 화염 진동 불안정성이 나타나는 화 염소화가 발생하는 임계 몰분율의 변화는 거의 나타나지 않게 된다 는 것을 의미한다.



4.1.2 결 론

저신장율 대향류 확산화염에서 수축하는 원형화염의 특성과 화염 구멍과 원형화염을 구분짓기 위한 연구를 수행했다. 그리고 전체신 장율, 속도비 그리고 장막유동의 속도변화의 영향을 조사하였다. 그 결과는 다음과 같다.

C-curve상에서 성장모드의 진동으로 소화하는 영역, 진동없이 화 염외부에서 내부로 수축하며 소화하는 영역, 화염구멍을 통해 소화 가 시작되는 영역으로 3가지로 나눌 수 있다.

고신장율 확산화염에서는 화염 반경이 충분히 커서 반경 방향의 열손실이 상대적으로 작아지므로 고신장율 화염에서는 에지화염 진 동은 나타나지 않는다. 저신장율 소화화염에서는 전체신장율이 감 소할수록, 속도비는 증가할수록 화염반경을 감소한다. 이것은 속도 비가 증가함에 따라 에지화염의 진동 불안정성이 심해진다는 것을 의미한다. 그러나 장막유동의 속도변화는 소화화염에 거의 영향을 주지 않았다.

에지변위속도를 관찰한 결과, 에지화염 전파속도는 팽창하는 화 염에서 조차도 음의 속도를 나타났다. 장막유동의 속도가 증가할수 록 안정화되는 화염반경에 도달하였고, 장막유동의 속도 증가로 인 하여 에지 변위 속도가 증가함을 보였다. 이것은 장막 유동 속도를 증가시키면 에지변위속도 증가를 통해 알 수 있지만 화염 불안정성 은 증가하여야 하나 국부 신장율의 증가에 따른 화염강도의 강화 그리고 화염 반경 증가를 통한 열손실 감소를 통해 화염안정화에 기여하는 상반된 효과로 화염 진동 불안정성이 나타나는 전체화염 신장율의 변화와 화염소화가 발생하는 임계 몰분율의 변화는 거의 나타나지 않게 된다는 것을 의미한다.



4.2. 버너직경 변화에 따른 효과

4.2.1 결과 및 논의

Figure 4.7은 전체화염신장율에 따른 화염소화 임계몰분율의 변화 를 버너직경 18 mm, 26 mm 그리고 46 mm에 대해 비교하여 나타 내었다. 실선의 화살표는 각 조건에서의 전환점 (Turning Point)을 나타내고 있다. 현재의 실험 데이터들에서 알 수 있듯이 버너 직경 이 작을수록 화염소화 임계 몰분율은 낮게 나타나고 전환점 또한 고신장율 영역으로 이동한 것을 알 수 있다. 저신장율 화염에서 18 mm 버너직경으로 수행했을 때 화염소화 임계 몰분율이 작게 나타 난 것과 전환점이 이동한 이유는 상대적으로 화염 길이가 감소하기 때문에 복사열손실에 추가하여 반경방향으로의 전도 열손실에 기인 하기 때문으로 이해된다. 그리고 고신장율 화염에서는 열손실과 부 력효과를 무시할 수 있기 때문에 각 조건에서의 화염소화 임계 몰 분율은 하나의 곡선으로 일치한다.



(c) Vr = 4

Fig. 4.7 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate at various flame conditions

Figure 4.8는 18 mm 버너 직경에 대해 화염 소화 모드를 나타내 고 있다. Fig. 4.8에 나타낸 바와 같이 전체화염신장율이 6 s⁻¹의 경 우 화염 소화는 화염디스크의 외각의 에지화염의 진동을 통하여 소 화하는 것을 알 수 있다. 전체화염신장율이 15 s⁻¹인 경우 화염 진동 없이 화염디스크는 에지화염이 음의 전파속도를 가지면서 화염중심 을 향해 수축하는 것을 볼 수 있다. 그리고 전체 화염신장율이 80s⁻¹ 인 경우 화염 진동 및 화염 디스크의 수축없이 화염면 내부에 화염 구멍이 발생하면서 화염 내부에서 외부로 음의 전파속도를 가지면 서 화염 소화가 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 18, 26 그리고 46 mm 버너직경간의 반경방향의 전도열손실 효과와 천이영역구분 을 명확히 하기 위해 속도비와 전체화염신장율에 따라 화염 소화 모드를 체계적으로 정리하여 Table 4.2과 같이 나타내었다.

CH OL Y



		D=18mm	D=26mm	D=46mm		D=46mm
		L=15mm	L=15mm	L=20mm		L=15mm
Regime	Vr	a_{g}, s^{-1}	a_{g}, s^{-1}	a_{g}, s^{-1}	Vr	a_{g}, s^{-1}
Ι		≤ 20	$\leq \! 19$			
П		21-44	20-30	14-22		21-24
Ш	2	$45 \leq$	31 ≤	23≤	1	25≤
Turning point		40				
Ι		≤28	≤22			
П		29-44	23-31	12-23		18-24
Ш	3	45≤	$32 \leq$	24≤	1.5	25≤
Turning point	1	40	35	25	1	
Ι	15	≤ 31	≤ 24		5	1
П	O	32-59	30- <mark>39</mark>	12-24	14	16-24
Ш	4	$60 \leq$	$40 \leq$	25≤	2	25≤
Turning point	Y	40	35	25	S	
Ι	5	≤ 31	_	/	1-	/ -
П	12	32-74	-	-	-	/ -
Ш	5	$75 \leq$		- /	V	—
Turning point		40		TT I	/	_
		0	7 CH	21		

Table 4.2 The classification of flame extinction modes for the burner diameters of 18.0, 26.0, and 46.0 *mm*.

Table 4.2에 나타낸 바와 같이 18, 26 그리고 46 mm의 버너직경 에 대해서 Regime I 은 에지화염이 진동하면서 화염디스크가 수축 하면서 화염이 소화되는 영역, Regime Ⅱ는 에지화염 진동없이 화염 디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역, 그리고 Regime Ⅲ는 화 염디스크가 수축하지 않고 화염면에 화염구멍이 생성되어 소화되는 영역이다. 버너직경이 감소할수록 전환점의 위치와 각 Regime은 고 신장율로 이동된 것을 알 수 있다. 특히, 18 mm 버너직경을 사용한 경우를 살펴보면 고신장율 화염의 전형적인 소화기구라 할 수 있는 화염 구멍에 의한 화염 소화 모드인 regimeIII는 전환점을 지나는 고신장율 화염에서 나타나고 또한 속도비가 증가할수록 더 높은 전 체화염신장율에서 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 버너직경이 감소할수록 화염길이 또한 감소하기 때문에 반경방향의 전도열손실에 의한 영향이 커져 고신장율 화염에는 반경방향의 전 도열손실이 크게 작용함을 의미한다.

Figure 4.9는 버너직경에 따른 소화점 부근에서평균 화염반경을 전체화염신장율에 따라 나타내고 있다. 위의 Table 1을 토대로 각 Regime의 경계를 접선으로 나타내었다. 에지화염 진동없이 화염디 스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역인 Regime Ⅱ의 경우 버 너직경 18와 26 mm 대해서 각각 화염반경 약 8 와 12 mm 이상일 경우에 나타났고, 그 미만인 경우에는 에지화염이 진동하면서 화 염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역인 Regime I 이 나타 났다. 또한 화염구멍으로 소화되는 영역인 RegimeⅢ는 각각 화염반 경 약 13, 18, 30 mm 그리고 버너직경 46 mm와 버너간격 20 mm에 5인 경우, 전환점($a_g = 40 \ s^{-1}$)을 지난 고신장율 영역이라도 화염소 화 모드가 RegimeIII로 나타나는 임계화염반경에 도달하지 못한다 면 화염소화는 화염구멍을 통해 나타나지 않고 여전히 화염진동없 이 수축하는 Regime II 의 영역에 속해있는 것을 볼 수 있다. 따라서 버너직경에 따라 화염소화 Regime을 구분짓는 임계화염반경이 존 재한다는 것을 의미한다. 이에 속도비에 따라 각 Regime에 대한 화 염반경과 버너직경간의 비로 특성화 하여 Fig. 4.10와 같이 나타내 었다.

Figure 4.10 속도비에 따라 무차원된 임계화염반경을 나타내고 있 다. Fig 4.10에서 나타나듯이, Regime Ⅰ·Ⅱ와 Regime Ⅱ·Ⅲ의 경계가 0.46와 0.68에서 각각 존재하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 화염소화 모드는 C-커브에서의 전환점으로 나뉘는 것보다는 화염 길이에 지배적인 것을 알 수 있다.

기존 연구에서 저신장율 화염에서 에지화염 진동에 대해 고찰하 였고, 속도비, 전체화염신장율을 변화시키며 반경방향으로 전도 열 손실에 의해 연료 Lewis 수가 1보다 작은 경우에도 에지화염 진동 불안정성이 나타날 수 있음을 보였다.[27] 이러한 에지화염 진동을 특성화하기 위해 버너직경 18, 26 그리고 46 mm 버너에 대해 얻어 진 데이터들을 Peclet 수와 Strouhal 수로 나타내었다. Fig. 4.11에 나타난 바와 같이 에지화염 진동 불안정성의 거동은 다음과 같은 식(4.4)로 하나의 곡선으로 묘사될 수 있음을 알 수 있다.

$$St = 10.11 P e^{-0.863} \tag{4.4}$$

여기서 *St*=*fD*/*U_f*는 Strouhal 수, *Pe*=*LU_f*/α는 Peclet 수이다. *f* 는 에지화염 진동주파수, *D*는 버너 직경, *L*은 버너 간 간격, *U_f*는 연료 측 출구 속도, 그리고 α는 연료측에서의 열확산계수이다. 저신 장율 화염에서 전체화염신장율의 증가는 Peclet 수의 증가를 의미하 고 Peclet 수의 증가가 화염안정화에 기여한다는 기존 연구들의 결 과들과 잘 일치하고 있다.[41]



Fig. 4.9 Various of critical flame radius for flame extinction with global strain rate in terms of (a) D = 18 mm, L = 15 mm (b) D = 26 mm, L = 15 mm (c) D = 46 mm, L = 15 mm (d) D = 46 mm, L = 20 mm



Fig. 4.11 The Characteristic of non-dimensionalized edge flame oscillation.

4.2.2 결 론

대향류 확산화염에서 수축하는 화염디스크로부터 화염구멍이 생 성되어 소화하는 영역으로 천이에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 전체화염신장율, 속도비 그리고 버너직경의 변화의 효과에 대해 조 사하였고 그 결과는 다음과 같다.

버너 직경이 감소함에 따라 화염소화 임계질소몰분율은 큰 버너 직경으로 수행했을때 보다 상대적으로 낮게 나타났다. 이것은 작은 버너를 사용하는 경우 저신장율의 화염소화에 중대한 역할을 하는 반경방향 전도열손실의 효과가 크게 작용하기 때문이다. 그리고 18, 26 그리고 46 mm 버너직경을 사용하는 경우 에지화염이 진동하면 서 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역 (Regime I), 에지화염 진동없이 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역 (Regime II), 그리고 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역 (Regime II), 그리고 화염디스크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역 도드가 나타났다. 큰 버너직경으로 수행한 결과 18 mm 버너직경으 로 수행한 결과보다 각 Regime과 전환점이 저신장율 영역으로 이 동하였고 이 또한 큰 버너직경으로 수행했을 때 반경방향의 전도열 손실의 효과가 감소되는 것을 의미한다. 그리고 각 Regime의 경계 를 전체화염신장율을 따라 평균화염반경으로 나타낸 결과, 화염소 화 모드는 C-curve에서의 전환점으로 나뉘는 것보다는 화염길이에 지배적이고 버너직경에 따라 화염소화 Regime을 구분짓는 임계화 염반경이 존재함을 확인하였다. 버너직경, 속도비, 전체화염신장율 에 따라 저신장율 화염에서 나타나는 에지화염의 진동은 Stouhal 수와 Peclet 수에 의해 하나의 곡선으로 잘 특성화된다.



제 V장 결 론

질소를 희석한 메탄-공기 대향류 확산화염에 대한 실험적 연구를 이용하여 화염소화거동 특성과 화염불안정에 영향을 미치는 인자에 대한 이해를 명확히 하고자 하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결 론을 얻었다.

1) C-curve 상에서, 에지화염이 진동하면서 화염디스크가 수축하면 서 화염이 소화되는 영역(Regime Ι), 에지화염 진동없이 화염디스 크가 수축하면서 화염이 소화되는 영역(Regime Π), 그리고 화염디 스크가 수축하지 않고 화염면에 화염구멍이 생성되어 소화되는 영 역(Regime Π)으로 세가지의 화염 소화 모드가 나타났다.

2) 장막유동의 유량변화에 따른 실험에서, 장막유동의 유량 증가로 인하여 국부신장율이 증가하여 안정화되는 화염반경에 도달하였지 만 반면 에지 변위 속도의 증가로 인하여 화염의 불안정성이 상대 적으로 증가되어 이는 서로 상반되는 효과로 인하여 화염소화 임계 몰분율에 영향을 주지 못했다. 고신장율에서는 화염외측으로 질소 유동을 유도하므로 반응에 참여하는 반응화학종의 농도를 감소시키 기 때문에 화염강도가 감소될 것으로 예상되지만 실제 본 실험에서 는 크게 영향을 주지 못했다.

3) 버너직경 변화에 따른 실험에서, 버너직경이 감소함에 따라 화염 소화 임계질소몰분율은 큰 버너직경으로 수행했을 때보다 상대적으 로 작게 나타났다. 이는 작은 버너직경을 사용하는 경우 저신장율 의 화염소화 메커니즘인 반경방향의 전도열손실의 효과가 크게 작 용하기 때문으로 판단된다.

4) 각 Regime의 경계를 속도비에 따라 평균화염반경과 버너직경의 비로 무차원시킨 결과, 각 Regime을 구분짓는 임계값이 존재함을 확인할 수 있었다. 이는 화염소화모드는 C-curve상의 전환점으로 나뉘는 것보다 화염길이에 지배적이다는 것을 알 수 있다.

5) 버너직경, 속도비, 전체화염신장율에 따라 저신장율 화염에서 나 타나는 에지화염의 진동은 Stouhal 수와 Peclet 수에 의해 다음 식 과 같이 하나의 곡선으로 잘 특성화 된다.

$$St = 10.11 Pe^{-0.863}$$

갑사의 근

2007년 3월.. 부경대 기계공학과로 편입학으로 들어와 지금의 실 험실에서 연구하고 공부한지 벌써 4년이 지났습니다. 지금 생각해 보면 아무것도 없는 창고 같은 실험실에서 책상 한 개만 두고 받새 공부한 게 엊그제 같은데 벌써 석사를 졸업하게 되었습니다. 제가 여기까지 오기까지 많은 분들의 도움이 있었기에 이 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

우선, 제가 가장 좋아하고 존경하는 박정교수님 진심으로 고개 숙여 같사의 뜻을 전합니다. 항상 부족한 저를 가르치면서 연구자 의 방향과 인생의 도디를 깨우치게 해주신 점과 더불어 제가 새로 운 끊과 목표를 가지게 해준 점에 진심으로 같사드립니다. 아직도 교수님께서 말씀하시 'Only my way'라는 말을 마음속 깊이 새기고 있습니다.

세미나를 통해 부족한 부분을 지적해주시고 많은 조언을 해주신 배대석 교수님 그리고 김정수 교수님, 계산에 대한 조언을 해주신 오창보 교수님, 실험에 필요한 부분을 지원해주신 이의주 교수님께 깊이 같사드리며, 대학원 과정동안 배움의 깊이를 더해주신 기계공 학과 모든 교수님께도 갑사드입니다.

실험에 대해 그리고 인생에 대해 항상 같이 고민해주시고 일본에 서 현재 박사과정인 준성이 형에게도 진심으로 감사드리며, 앞으로 유학 같 마치고 원하는 꿈을 이루기를 기원합니다. 그리고 많은 조 언과 실험에 필요한 부분을 지원해주신 한국기계연구원에 윤진한박 사님, CSK의 김승곤박사님에게도 감사의 맞씀드립니다.

실험실에서 동거동학하며 지내면서 영어부분에 많은 도움을 준

Tran Manh Vu 박사님께도 깊은 감사드리고, 차후 베르낲에 돋아 가서 훌륭한 교수님 되시길 진심으로 기원합니다. 식협식 일득은 같이 도와가며 서로 식협부분에 많은 도움은 준 성환이 형에게 간 사드리며 많은 학업을 이루기를 기원합니다. 중학교때부터 친구면 서 식협실동료인 문창우에게도 깊은 감사드리고, 진심으로 몸이 빨 지 완쾌되길 바랍니다. 항상 식협식 고총을 의논한 안전과의 정훈 이 형, 궂은일도 마다하지 않고 성식하고 믿음직한 현재 식협식장 인 후배 진영규, 제 연구테마를 문려받아서 열심히 하는 정용호, 각 자 테마를 받아 수행하는 송원식, 한종규, 이원준, 이제 막 들어와 아직은 어지둥적한 오상훈, 박경원에게도 감사의 마음을 드리며, 항 상 열심히 하여 뛰어난 연구자가 되어 10년 뒤 멋진 모습을 기대합 니다. 다른 실험실이지만 항상 같이 생활하고 고민상담 해준 이윤 태, 후배 정송욱에게도 감사드리며, 또한 이번에 post-doc으로 오신 김경호 박사님게도 감사드리고 좋은 연구 결과를 내시기를 기원합 니다.

오늘의 제가 있기까지 깊은 사랑으로 돋보아 주신 존경하는 아버 지, 어머니 가슴속 깊이 갑사드리고, 한결같은 믿음과 격려해주신 미래 장모님께 갑사드리며, 제가 항상 실험실에 있어서 집안일에 소훈히 한 부분을 떼워준 저의 형에게도 갑사한 마음을 전하고 싶 습니다.

끝으로 항상 저를 믿고 사장으로 뒷바라지해준 나의 미래 아내 수연이에게 같사의 따음을 전하고, 앞으로 더 멋진 미래를 기대하 면서 이 기쁨을 함께 하고 싶습니다.

> 2011 년 01월 박 대 근 올림

참고문헌

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

[2] Z, Lu. and S. Ghosal, "Flame holes and flame disks on the surface of a diffusion flame", *J.FluidMech.* Vol.513, pp.287-307, 2004.

[3] A. Ciani, W. Kreutner, W. Hubschmid, C.E. Frouzakis, and K. Boulouchos, "Experimental investigation of the morphology and stability of diffusion and edge flames in an opposed jet burner", *Combust. Flame*, Vol.150, pp.188-200, 2007.

[4]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.

[5] 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. [6] B.J. Lee, S.H. Chung, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet", *Combust. Flame*, Vol. 109, pp 55-70, 1997.

[7] 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.

[8] 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.

[9] H.D. Ross, "Ignition of and flame spread over laboratory-scale pools of pure liquid fuels", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 20, pp 17-63, 1994.

[10] L.J. Hartley, J.W. Dold, "Flame propagation in a nonniform mixture: analysis of a propagating triple-flame", *Combust. Sci. Tech.* Vol. 80, pp 23-46, 1991.

[11] J.W. Dold, "Flame propagation in a nonuniform mixture: Analysis of a slowly varying Triple Flame", *Combust. Flame*, Vol.76, pp.71-88, 1989. [12] P.N. Kioni, B. Rogg, K.N.C. Bray, A. Liñán, "Flame spread in laminar mixing layers: The triple flame", *Combust. Flame*, Vol.95, pp.276-290, 1993.

[13] G. R. Ruetsch, , L. Vervisch, A. Liñán, "Effects of heat release on triple flames", *Phys. Fluids.*, Vol.7, pp.1447-1454, 1995.

[14] Thatcher, R.W. and Dold, J, W., "Edges of flames that do not exist: flame-edge dynamics in a non-premixed counterflow", *Combust. Theory Modelling*, Vol.4, pp. 435-475, 2000.

[15] Buckmaster, J. D., "Edge-flames", Prog. Energy Combust. Sci.Vol. 28, pp. 435-475, 2002

[16] Buckmaster, J. D., "Large-Lewis-number Instabilities of Model Edge-flames", *Combust. Flame*, Vol. 127, pp. 2223-2233, 2001.

[17] Cha, M. S., Ronney, P.D., "Propagation rates of nonpremixed edge flame", *Combust. Flame*, Vol.146, pp.312-328, 2006

[18] Kurdymov, V.N., Matalon, M., "Dynamics of an Edge Flame in a Mixing Layer", *Combust. Flame*, Vol.139, pp.329-339, 2004

[19] 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*, Vol.8, pp.683-699, 2004 [20] Buckmaster, J. D., Zhang, Yi, "Oscillating edge-flames", *Combustion Theory and Modelling*, Vol.3(3), pp.547-565, 1999

[21] 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.

[22] shay, M. L., Ronney, P. D., "Nonpremixed edge flames in spatially varying straining flows", *Combust. Flame*, Vol.112.pp.171-180, 1998

[23] Carnell Jr., W. F., Renfro, M. W., "Stable negative edge flame formation in a counterflow burner", *Combust. Flame*, Vol.141, pp.350-359, 2005

[24] Sohn, C. H., Kim, J. S., Chung, S. H., and Maruta, K., "Nonlinear evolution of diffusion flame oscillations triggered by radiative heat loss", *Combust. Flame*, Vol.123, pp.95-106, 2000

[25] Christiansen, E, W., Law, C. K., Sung, C. J., " The role of pulsating instability and global lewis number on the flammability limit of lean heptane/air flames", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.28, pp.807-814, 2000.

[26] Maruta, K., Yoshida, M., Ju, Y., Niioka, T., "Experimental

study on methane-air premixed flame at small stretch rates in microgravity", Proc. Combust. Inst. Vol.26, pp.1283-1289, 1996

[27] 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.

[28] 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.

[29] [12] J.H. Yun, D.G. Park, S.I. Keel, J. Park, "Behavior of low strain rate flame disks in counterflow diffusion flame" *Int. J. Spray Combust. Dynamics* 1, 2009, pp.473-496.

[30] Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V., "Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis", Dover Pubns, ISBN-10 : 0486406830, ISBN-13 : 9780486406831, 1999.

 [31] Peters, N., "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion", *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 10, pp.319-339, 1984.
[32] Tsuji, H. and Yamaoka, I., "Counterflow Diffusion Flames", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 8, pp. 93-119, 1984.
[33] Puri, I. K. and Seshadri, K., "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air", *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 137-150, 1986.

[34] Peters, N., Kee, R. J., "The computation of stretched laminar flames using methane-air diffusion a reduced four-step mechanism", Combustion and Flame, Vol. 68(1), pp. 17-29, 1987. Seshadri, K., Puri, I., Peters, N., "Experimental and [35] theoretical investigation of partially premixed diffusion flames at extinction", Combustion and Flame, Vol. 61(3), pp. 237-249, 1985. [36] Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D., Williams, F. A., "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-field Effects on the Extinction Condition Methane-air-nitrogen Diffusion Flames", of Proc. Combust. Inst., Vol. 23, pp. 503-511, 1990.

[37] Nanduri, J. R., "A Computational Study of Structure, Dynamic Response, and Extinction Characteristics of Edge Diffusion Flames", *Master's Thesis*, Case Western Reserve University, 2002

[38] Park, J. S., "Dynamic Behaviors of Oscillation Edge-Flame in Low Strain Rate Counterflow Diffusion Flames", *Master's Thesis*, Sunchon national university, 2008.

[39] Williams, F. "Combustion The A., Theory", Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1985, pp.350-352 오창보, 박 정, 김정수, Anthony Hamins, "미소 중력장에 있 [40] 는 저신장율 화염소화에 미치는 다차원 효과", 대한기계학회논문집 B권, 제 29권 제 9호, pp. 988-996, 2005. [41] Sohn, C. H., Chung, S. H., Kim, J. S., "Instability-Induced Extinction of Diffusion Flames Established in the Stagnant Mixing Layer," Combust. Flame., 117, 1999, 404-412. H of in

A Study on Flame Extinction and Edge Flame Oscillation in Counterflow Diffusion Flame

Dae Geun Park

Department of Mechanical Engineering, Graduate School Pukyong National University

Abstract

Experiments have been conducted to clarify flame extinction mechanism, flame extinction modes, impacts of curtain flow rate and transition of low strain rate extinction characteristics to higher strain rates with finite burner diameters for counterflow non-premixed flames. Flame oscillation and flame extinction at low strain rate is shown to be responsible for excessive radial conductive heat loss at outer flame edge for current finite burner diameters of 18.0, 26.0, and 46.0mm. Flame extinction modes are classified into three for current burner diameters: a flame extinction through the shrinkage of outer flame edge without a flame hole on the flame surface at the final stage after oscillating for a while (regime I), a flame extinction through the shrinkage of outer flame edge without a flame hole after being stationary (regime II), and a flame extinction through a flame hole at a finite burner distance from the center without a shrinkage of outer flame edge or a flame

oscillation (regime III). The results show that low strain rate flame extinction characteristics are extended to higher strain rates over the turning point on a C-curve. It is also found that there exists critical limit flame lengths for the regimes I and II, and the edge flame oscillation can be characterized well by one curve with Strouhal number and Peclet number.

