

CH₄ / Air / CO₂ 대향류 확산화염에 대한 실험적 연구

이종원* · 이춘범** · 신현동***

An Experimental Study on the CH₄ / Air / CO₂ Counterflow Diffusion Flame

Lee Chong Won, Lee Chun Beom and Shin Hyun Dong

Key Words: Strain rate

Abstract

The effect of adding carbon dioxide to methane-air flame was investigated experimentally. Measurements included extinction limits, flame temperature and photographic investigation of flame. A diffusion flame was stabilized between counterflowing streams of methane diluted with carbon dioxide and air diluted with carbon dioxide. Extinction limits and temperature for such flames were measured over a wide parametric range and were compared with those for other flames that fuel or oxidant was diluted with nitrogen or argon. The experimental results indicate that extinction phenomena can be explained by thermal effect and as an amount of carbon dioxide in fuel or oxidant increases, greatly as compared with other flames flame-temperature falls and flame-thickness is reduced.

기호설명			
a	Strain rate	T _{sur}	주위의 온도(실내온도)
L	Separation distance between two nozzles	σ	Stefan-Boltzmann 상수
V _f	Exit velocity of fuel stream	ε	열전대 비드의 표면 방사율 (Emissivity)
V _o	Exit velocity of oxidizer stream	T _{max}	Maximum temperature
ρ _f	Density of fuel stream	Q _d	$\frac{\dot{m}_d \times C_{p,d}}{\dot{m}_{air} \times C_{p,air} + \dot{m}_d \times C_{p,d}}$
ρ _o	Density of oxidizer stream	m _{air}	Mass flow rate of air
h	가스로부터 열전대 비드로 전달되는 대류 열전달 계수	m _d	Mass flow rate of diluent
T _{real}	실제 구하고자 하는 화염온도	C _{p,air}	Specific heat of air
T _{th}	열전대에 의해 구해진 온도	C _{p,d}	Specific heat of diluent

Subscripts

f	fuel
o	oxidizer
d	diluent

1. 서 론

현존하는 연소시스템은 대부분 공기를 산화제로 사용하고 있기 때문에 대도시의 광화학 스모그 및 산성비의 원인인 NO_x 를 배출하게 되며, 화염온도의 증가의 한계에 따른 저효율의 문제가 있다. 이에 저공해 고효율의 연소시스템을 개발해야 하는 상황에서 산화제로 순수 산소를 사용하는 것에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 산화제로 순수 산소를 사용하게 되면 NO_x 를 근원적으로 차단할 수 있다는 장점과 함께 배기가스가 H_2O 와 CO_2 만이 나오므로 이들의 분리가 용이함을 이용하면 배기가스의 재사용이 쉽게 가능해진다는 장점이 있다.

산화제로 산소를 사용할 경우 연소기 내부가 너무 고온이 되므로 적절히 온도를 낮추기 위한 희석제가 필요하게 된다. 기존의 많은 연구에서 희석제로 사용되었던 것은 N_2 이지만 산화제가 질소와 산소로 구성되어 있을 때 화염온도의 상승은 Thermal NO_x 의 생성을 촉진시켜 그 양이 급격히 상승하게 된다. 산화제 속의 질소가 매우 적으면 NO_x 의 양은 감소하지만 약 5%정도만 남아 있어도 일반 공기를 이용한 연소와 같은 정도의 NO_x 배출 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 저공해 연소시스템을 위한 산소연소(Oxygen Combustion)의 희석제로 N_2 는 적합하지 아니하다. 이에 희석제로 주목하게 된 것이 CO_2 이며 희석제로 CO_2 를 사용하게 되면 NO_x 를 완전히 차단할 수 있고 또한 배기가스 중의 CO_2 양이 증가함에 따른 H_2O 와의 분

리가 더욱 용이해진다. 따라서 궁극적으로는 배기가스 중의 CO_2 를 다시 희석제로 사용할 수 있어 CO_2 Recycling에 의한 산화제의 Preheating 효과를 얻을 수 있으며 희석제로 사용되는 CO_2 를 아낄 수 있다.

저공해 고효율 연소 시스템의 개발이 경제적인 측면과 다가올 환경문제와 기후협약에 의한 국제사회의 요구를 만족시키기 위하여 절실히 필요한 시점에서 이를 위한 기초 연구로 CO_2 를 사용하여 연료나 산화제의 조성을 제어하며 화염에 대한 기초적인 연소 현상과 구조를 관찰하는 것은 시기적으로 매우 필요한 연구라 할 수 있다.

이에 본 실험에서는 화염에 대한 연소 현상(소염 특성)과 구조를 관찰함에 있어 화염을 1차원적으로 해석할 수 있는 대향류확산화염(counterflow diffusion flame)을 대상으로 CH_4 -Air화염에 CO_2 를 첨가하여 화염의 기초적인 현상을 관찰하였으며 CO_2 첨가의 특성을 관찰하기 위해 다른 희석제(N_2 , Ar)를 첨가한 경우도 실험을 수행하였다.

* 현대자동차

** 자동차 부품연구원

*** 한국과학기술원

2. 실험장치, 조건 및 방법

2.1. 실험장치

2.1.1 대향류 버너

본 실험에 사용된 버너의 개략도를 나타내었다. 버너의 전체 길이는 약 186mm로 설계하였고 폭은 100mm가 되도록 하였다. 버너의 노즐 출구에서 일정한 유동(uniform flow)을 유지하도록 Contraction[1]을 주었으며 버너의 중간부분에 screen mesh와 미세 구슬(glass bead)을 삽입하여 유동의 맥동 현상이 제거되도록 하였다. 안쪽 노즐(inner nozzle)의 경우 직경을 10mm로 하였고 주위에는 5mm 정도의 공간으로 주위류(질소)가 분출되도록 바깥 노즐의 직경을 20mm로 하여 주위 공기의 유입을 차단할 수 있도록 하였다. 아래 위로 위치한 두 버너 노즐 사이의 간격은 안쪽 노즐(inner nozzle) 직경과 동일한 10mm로 하였다. 화염 생성 후 열 전달에 의하여 산화제가 heating되는 것을 방지하기 위하여 water jacket을 만들어 위쪽노즐에 부착하였다. 냉각수(cooling water)가 노즐에 직접 접촉하도록 하여 냉각효과를 높였다. Fig.2-1은 전체적인 대향류 버너의 모습을 보여주고 있다.

2.1.2 유량계

넓은 범위의 strain rate에 대하여 실험할 수 있도록 유량의 제어는 manometer를 이용하였다. 7개의 channel을 통하여 연료와 산화제 그리고 3종류(CO_2 , N_2 , Ar)의 희석제를 버너에 공급할 수 있게 하였으며 유량이 매우 미량인 경우는 orifice대신 capillary tube를 이용하여 유량제어를 하였다. 유량의 calibration은 bubble meter를 이용하였다.

2.2. 실험 조건 및 방법

2.2.1 기초실험

실험장치의 검증 차원에서 노즐 출구에서 속도가 일정하게 나오는 지를 측정

하였으며 유동장을 관찰하기 위하여 단면 가시화 실험을 하였다.

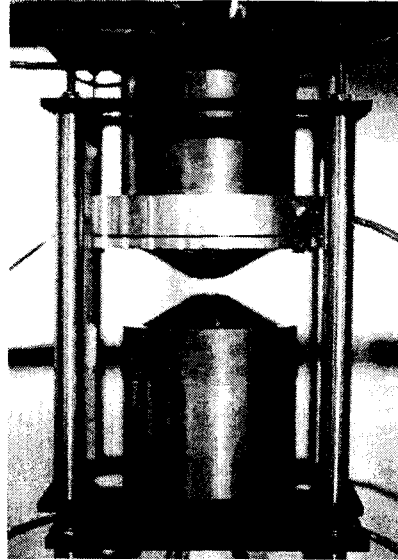


Fig 2-1 Counterflow burner

2.2.2 소멸(Extinction)특성 실험

연료분율, 산소분율의 변화와 Strain rate의 변화에 따른 소멸특성과 여러 희석제간의 소멸조건 차이를 비교하기 위해 Fuel Stream에서 연료가 차지하는 volume fraction을 변화시켜가면서 그리고 Oxidizer Stream에서 산소가 차지하는 volume fraction을 변화시켜가면서 화염의 소멸 조건을 찾아보았다.

연료측의 연료분율 변화에 따른 실험에서, Strain rate가 노즐 출구에서의 반응물 속도에 관계되기 때문에 노즐에서의 속도를 여러 단계로 나누어 각 단계에서 먼저 연료(CH_4 , C_3H_8)의 조성을 100%로 하여 안정화 된 화염을 만든다.(산화제는 순수 Air) 그리고 나서 희석제(CO_2 , N_2 , Ar)를 조금씩 첨가해 가면서 화염이 갑자기 꺼지는 지점을 찾아 이를 소멸 조건으로 하였다. 희석제를 연료에 첨가해 가는 과정에서 첨가하는 희석제의 양을 매우 조금씩 조절하여 매우 정밀한 소멸 조건을 찾을 수 있도록 하였으며 연료와 희석제가 mixing되는 시간을 고려하여 실험을 전개하였다. 희석제를 연료에 첨

가해가면서 화염의 위치가 점점 아래쪽으로 이동하지 않도록 산화제(순수 Air)의 분출 속도를 조절하여 화염이 되도록 양쪽 노즐 중앙에 위치하도록 하였다. 마찬가지로 산화제의 조성변화에 따른 실험에서 역시 노즐 출구에서의 속도를 여러 단계로 나누어 각 단계에서 안정화된 화염을 만든 후 산화제(Air)에 희석제를 첨가해 가면서 화염의 소염 조건을 찾았다.

Strain rate는 Seshadri와 Williams가 밝힌 characteristic strain rate[2]를 사용했으며 다음과 같이 표현된다.

$$a = \frac{(-V_o)}{L} \left[1 + \frac{V_f}{(-V_o)} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_o}} \right]$$

- a : Strain rate
- L : Separation distance between two nozzles
- V_f : Exit velocity of fuel stream
- V_o : Exit velocity of oxidizer stream
- ρ_f : Density of fuel stream
- ρ_o : Density of oxidizer stream

본 실험에서는 양쪽 노즐 사이의 간격(L)을 1cm로 하였다.

2.2.3 Direct Photography

화염의 거시적인 모습을 보기 위하여 여러 조건에서 직접사진 촬영을 하였다. 우선 연료나 산화제를 희석 시키지 않은 상태에서 Strain을 바꾸어 가면서 촬영을 하였으며, 다음으로 연료에 CO2를 첨가하여 연료분율과 strain rate를 바꾸어 가면서 촬영을 하였다.

2.2.4 화염의 온도측정 및 보정

혼합물의 변화와 Strain rate의 변화에 따른 화염온도의 변화와 화염두께의 변화, 그리고 희석제 종류에 따른 차이를 관찰하기 위해 여러 가지 조건에서의 화염온도를 측정하였다. 온도의 측정은 지름 50μm의 R-type thermocouple (Pt/Pt-Rh13%)을 이용하였으며 측정위치는 아래쪽 노즐 Tip 중앙에서 위쪽 노즐 Tip 중앙까지이다. Thermocouple을 정밀이송대에 부착하여 화염이 없는 곳에서는 0.5mm간격으로, 화염 가까이 그리고

화염이 존재하는 곳에서는 0.1mm간격으로 온도를 측정하였다. 온도측정을 위한 Thermocouple 삽입으로 인하여 유동장이 변화되는 것을 최소한으로 줄이기 위해 wire를 길게 그리고 화염과 평행이 되도록 하여 온도측정을 하였다. Thermocouple 삽입에 따른 온도측정 조건의 한계로 인하여 혼합률 변화에 따른 온도측정의 경우 연료측에만 희석제를 첨가하여 실험을 수행하였으며 연료로는 CH₄만을 사용하였다.

화염온도 측정시, 고온의 기체 속에 있는 열전대의 온도는 열전대 비드의 복사에 의한 열손실로 인해 실제 온도보다 낮은 온도로 측정된다. 열전대 비드에 연결된 리드선(lead wire)을 통한 전도 열전달과 열전대의 삽입으로 인한 유동장의 교란으로 인한 영향 등을 무시하면 주위 가스의 대류로 인한 비드로의 열전달이 비드의 복사에 의한 열손실과 같다는 에너지 평형식을 얻을 수 있으며 이는 다음과 같이 표현된다.[3]

$$\dot{h}(T_{real} - T_{th}) = \sigma \epsilon (T_{th}^4 - T_{sur}^4)$$

- h : 가스로부터 열전대 비드로 전달되는 대류 열전달 계수
- T_{real} : 실제 구하고자 하는 화염온도
- T_{th} : 열전대에 의해 구해진 온도
- T_{sur} : 주위의 온도(실내온도)
- σ : Stefan-Boltzmann 상수
- ε : 열전대 비드의 표면 방사율 (Emissivity)

위 식에서 T_{real}을 구하기 위해서는 열전대 비드로의 평균 대류열전달계수를 구해야 하며 이는 구 주위의 강제대류 열전달에서의 Nusselt Number 관계식으로부터 구하였다.[4]

3. 실험결과

3.1. 기초실험

3.1.1 노즐출구 속도측정

실험장치 설계 시 노즐 출구에서의 속도가 일정하게 나오도록 노즐 출구 이전에 Contraction을 주었는데 이를 확인 하고자 노즐 출구에서의 속도를 Hot wire를

가시고 측정하여 보았으며 그 결과를 Fig.3-1에 나타내었다. Fig.3-1에 나타난 바와 같이 노즐 끝부분에서 약간 속도가 떨어질 뿐 전체적으로 노즐 출구에서의 속도가 일정하게 나오는 것을 알 수 있다.

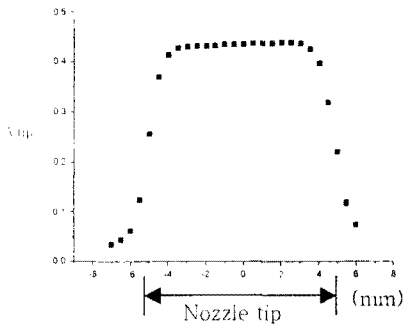


Fig.3-1 Velocity of nozzle tip

3.1.2 화염단면 가시화



Fig.3-2 Visualization of oxidizer stream



Fig.3-3 Visualization of fuel stream

대항류 버너의 유동장을 관찰하고자 단면 가시화 실험을 하였다. Kerosene을 증기로 만들어 Fuel stream과 Oxidizer stream에 각각 첨가한 후 He-Ne laser를 이용하여 단면 가시화를 하였다. Fig. 3-2는 Oxidizer stream에만 Kerosene증기를 첨가하여 가시화한 것이며 Fig. 3-3은 Fuel stream에만 Kerosene증기를 첨가하여 가시화한 것이다. 그림에서 빨간색으로 보이는 부분이 연료(CH₄)와 산화제(Air)가 노즐에서 분출되는 모습이며 노즐 중간에 화염이 존재하고 있다. Fig.3-3에서처럼 연료측에만 Kerosene증기를 첨가하여 가시화 한 경우 연료(아래쪽 노즐)와 산화제(위쪽 노즐)가 분출되어 중앙에 Stagnation plane이 형성되고 그 위쪽에 화염이 존재하게 되는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2 소멸(Extinction)특성 실험

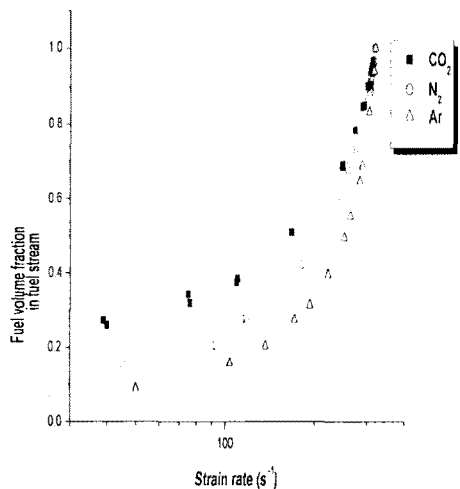
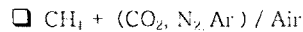


Fig.3-4 Values of fuel volume fraction in fuel stream as a function of the strain rate at extinction

a function of the strain rate at extinction

□ $\text{CH}_4 / \text{Air} + (\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{Ar})$

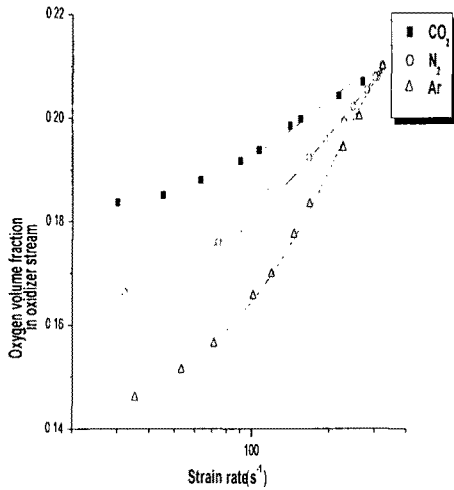


Fig.3-5 Values of oxygen volume fraction in oxidizer stream as a function of the strain rate at extinction

□ $\text{C}_3\text{H}_8 / \text{Air} + (\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{Ar})$

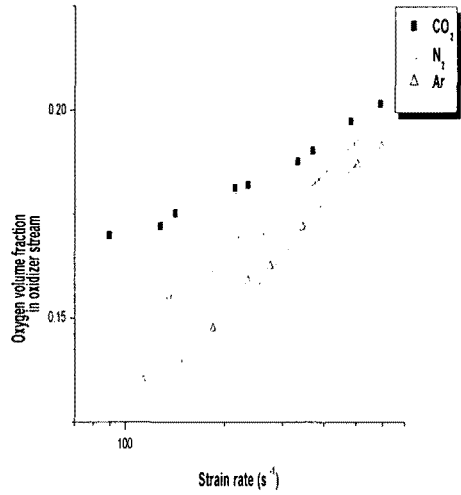


Fig.3-7 Values of oxygen volume fraction in oxidizer stream as a function of the strain rate at extinction

□ $\text{C}_3\text{H}_8 + (\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{Ar}) / \text{Air}$

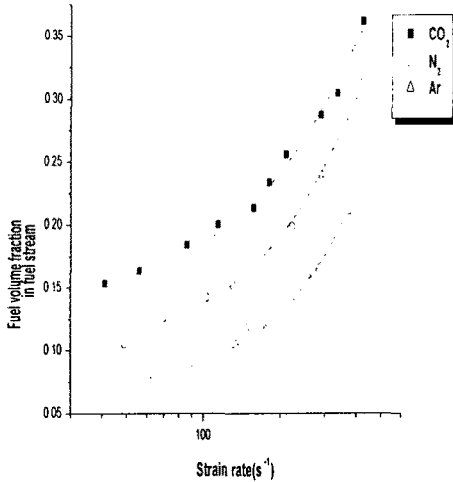


Fig.3-6 Values of fuel volume fraction in fuel stream as

□ $\text{CH}_4 / \text{Air} + (\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{Ar})$

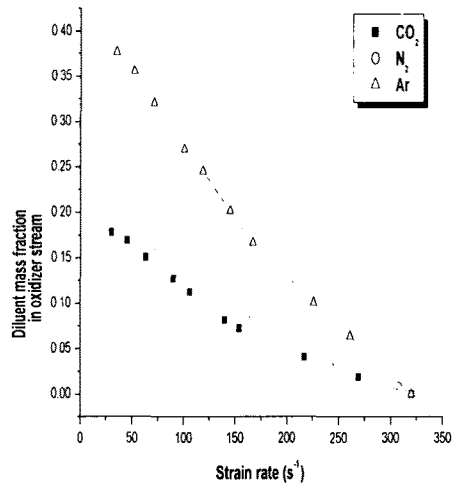


Fig.3-8 Values of diluent mass fraction in oxidizer stream

as a function of the strain rate at extinction

□ CH₄ / Air + (CO₂, N₂, Ar)

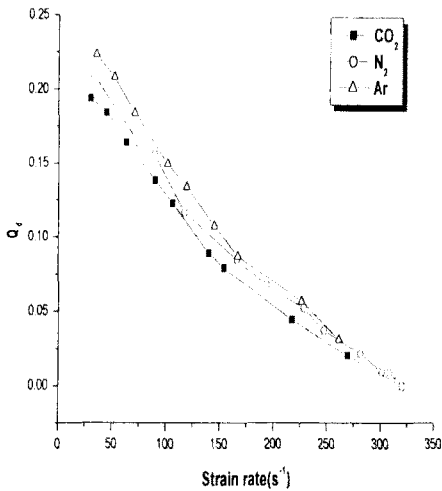


Fig.3-9 Values of Q_d in oxidizer stream as a function of the strain rate at extinction

□ C₃H₈ / Air + (CO₂, N₂, Ar)

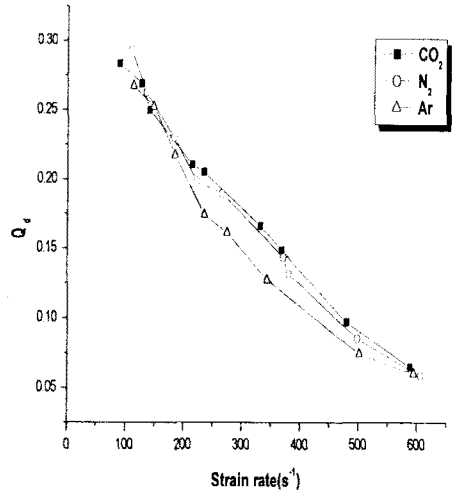


Fig.3-11 Values of Q_d in oxidizer stream as a function of the strain rate at extinction

□ C₃H₈ / Air + (CO₂, N₂, Ar)

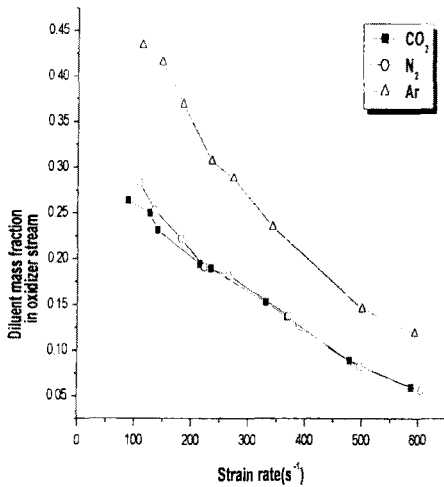


Fig.3-10 Values of diluent mass fraction in oxidizer stream as a function of the strain rate at extinction

Fig.3-4 ~ Fig.3-7은 CH₄ - Air 화염 그리고 C₃H₈ - Air 화염에 대한 연료분율과 산소분율의 변화와 Strain rate 변화에 따른 소염 조건을 나타낸 것이다. 각각의 그래프에서 선 위쪽으로는 화염이 존재하는 영역이고 아래쪽으로는 화염이 유지되지 않는 영역이다. Fig.3-4는 CH₄ - Air 화염의 연료측에 CO₂, N₂, Ar를 각각 첨가하여 소염조건을 구한 것인데 그래프에 보이는 바와 같이 CO₂의 경우 다른 희석제(N₂, Ar)에 비하여 소량을 첨가하여도 소염조건에 다다른 것을 볼 수 있으며 결과적으로 화염이 존재하기 위한 임계 연료농도(화염이 존재하는 최저 Strain rate에서의 fuel mole concentration) 값이 다른 경우에 비해 높아짐을 알 수 있다. Fig.3-5는 CH₄ - Air 화염의 산화제측에 역시 CO₂, N₂, Ar를 각각 첨가하여 소염조건을 구한 것인데 이 경우도 앞의 경우와 마찬가지로 CO₂를 희석제로 사용한 경

우가 더 빨리 소염조건에 다다름을 볼 수 있으며 화염이 존재하기 위한 임계 산소농도 값이 높아짐을 볼 수 있다. Fig.3-6과 Fig.3-7는 연료를 CH₄대신 C₃H₈를 사용하여 동일한 실험을 한 결과를 나타낸 것이다. 이 경우도 CH₄을 연료로 사용한 경우와 비슷한 결과를 보여 주고 있으며, 다만 C₃H₈을 연료로 사용한 경우는 연료나 산소의 농도가 낮은 경우에도 높은 Strain rate에서 화염이 존재하는 것을 볼 수 있다.

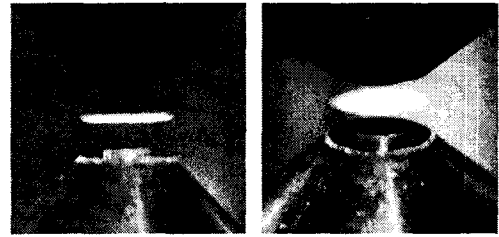
CO₂의 첨가가 화염의 소염에 어떠한 영향을 미치는 가를 살펴보기 위하여 실험으로 구한 소염조건에서의 희석제 volume fraction을 mass fraction으로 환산하고 여기에 비열(specific heat)을 이용하여 희석제가 갖는 열에너지의 분율(Qd)을 각각의 희석제에 대하여 구하여 보았다. Fig.3-8 ~ Fig.3-11은 CH₄ - Air 화염과 C₃H₈- Air 화염의 산화제측에 희석제를 첨가한 경우, 소염조건에서 희석제의 mass fraction 과 열에너지 분율(Qd)을 각각 나타낸 것이다. Fig.3-8과 3-9는 CH₄ - Air화염의 산화제 측에 희석제(CO₂, N₂, Ar)를 첨가한 경우, 소염 조건에서의 희석제에 대한 mass fraction과 열에너지 분율(Qd)을 나타낸 것이다. Fig.3-8에 나타난 바와 같이 CO₂첨가의 경우 mass fraction 값이 N₂를 첨가한 경우와 비슷함을 알 수 있으며 Ar의 경우에는 CO₂, N₂의 경우에 비해 2배정도의 높은 mass fraction값을 보이고 있다. Fig.3-9은 각각의 희석제가 갖는 소염조건에서의 열에너지 분율을 나타낸 것인데 세 경우가 거의 일치함을 보이고 있다. 세 경우가 일치한다는 것은 희석제 첨가에 의한 화염의 소염이 주로 thermal effect에 의한 것으로 생각 되어질 수 있으며 CO₂첨가의 경우도 마찬가지로 생각할 수 있다. Fig.3-10과 Fig.3-11은 연료를 C₃H₈으로 하여 역시 산화제 측에 희석제를 첨가한 경우의 희석제에 대한 mass fraction값과 열에너지 분율(Qd)을 나타낸 것인데 이 경우에서도 비슷한 결과가 나타남을 알 수 있다. Qd는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_d = \frac{\dot{m}_{d} \times C_{p,d}}{\dot{m}_{air} \times C_{p,air} + \dot{m}_{f} \times C_{p,d}}$$

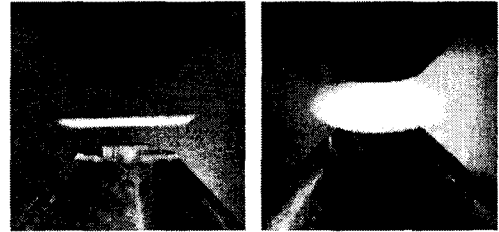
\dot{m}_{air} Mass flow rate of air
 \dot{m}_d Mass flow rate of diluent
 $C_{p,air}$ Specific heat of air
 $C_{p,d}$ Specific heat of diluent

3.3 Direct Photography

(a) a = 80



(b) a = 170



(c) a = 270

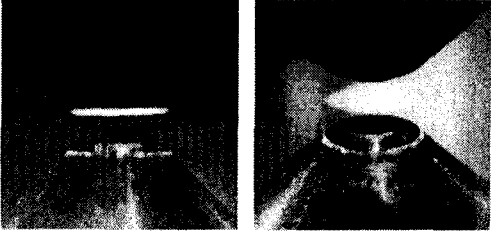


Fig.3-12 Images of CH₄ - Air flame
 (CH₄ 100%, Air 100%)

(a) $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 70 : 30$



(b) $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 40 : 60$



(c) $\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 34 : 66$

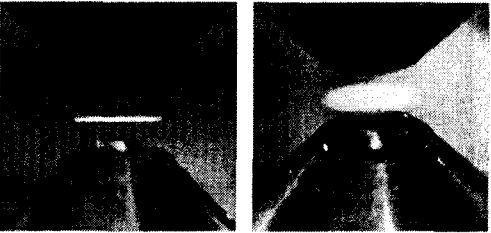
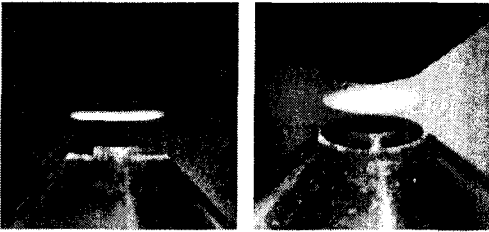


Fig.3-13 Images of $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ / Air flame
($a = 80$)

(a) $a = 80$



(b) $a = 150$



(c) $a = 249$



Fig.3-14 Images of $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ / Air flame
($\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 70 : 30$)

Fig.3-12는 CH_4 - Air 화염에서 연료나 산화제를 희석시키지 않은 상태에서 Strain rate를 바꾸어 가면서 촬영한 것을 나타낸 것이다. 시각적으로 Strain rate가 증가하면 화염의 두께가 작아지는 것은 관찰할 수 없으나 Strain rate가 높아지면서 화염 중앙의 자발광이 약해지는 것을 볼 때 Strain rate가 높아지면 화염의 온도가 떨어지는 것을 예측할 수 있다. 다음으로 연료에 CO_2 를 첨가하여 연료분율과 strain rate를 바꾸어 가면서 촬영을 하였다. Fig.3-13은 연료측에서의 연료분율의 변화에 따른 화염의 모습을 나타낸 것이다. 시각적으로도 CO_2 의 첨가량이 많을수록 화염의 두께가 작아지는 것을 관찰할 수 있으며 화염의 자발광도 약해지는 것을 볼 수 있다. Fig.3-13의 (c)의 경우는 소염직진의 화염의 모습을 촬영한 것인데 화염의 온도가 (a)의 경우보다 매우 낮아졌음을 시각적으로도 확인할 수 있으며 화염의 두께도 (a)의 경우에 비하여 매우 작아졌음을 알 수 있다. Fig.3-14은 연료측의 연료와 희석제의 혼합물을 CH_4 70%, CO_2 30%로 고정시키고 Strain rate를 증가시켰을 때의 화염의 모습을 촬영한 것이다. Strain rate가 증가함에 따라 화염의 두께가 줄어드는 것은 시각적으로 보기가 어려우나 화염온도의 경우 Strain rate가 증가하면 자발광이 약해지는 것을 볼 수 있었으며 특히 (c)의 경우는 소염 직진의 화염의 모습을 촬영한 것인데 화염 중앙부분이 확연히 약해졌음을 볼 수 있다. 거시적으로 관찰되어지는 연료분율의 변화나 Strain rate의 변화에 따른 화염의 모습을 온도측정의 결과와 비교하여 보면 그 경향이 비슷함을 알 수 있다.

3.3 온도 측정

3.3.1 혼합물 변화에 따른 화염 온도 변화

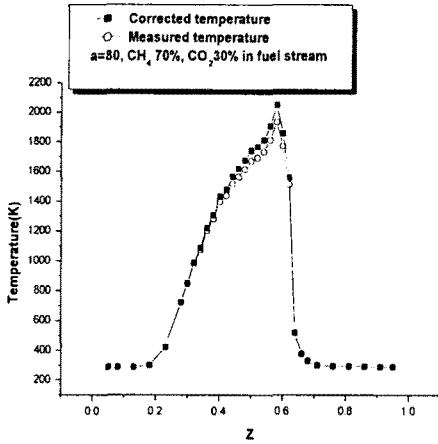


Fig.3-15 Comparison of measured temperature with corrected temperature

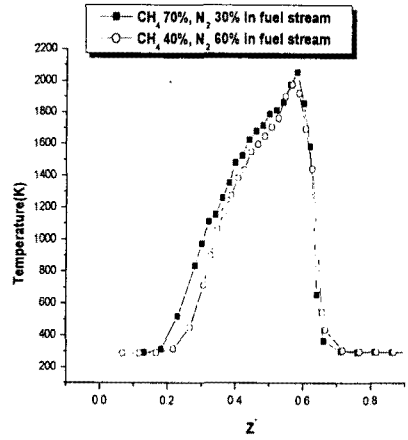


Fig.3-17 Temperature profiles (Diluent : N_2 , $a=80$)

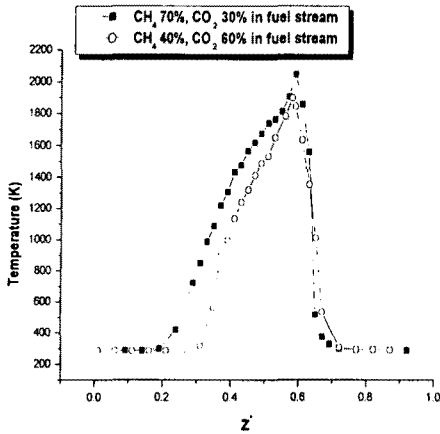


Fig.3-16 Temperature profiles (Diluent : CO_2 , $a=80$)

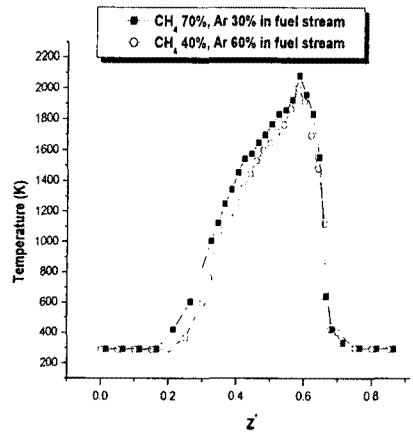


Fig.3-18 Temperature profiles (Diluent : Ar , $a=80$)

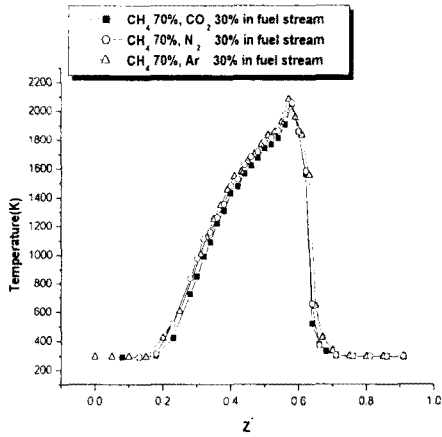


Fig.3-19 Temperature profiles
(CH₄ : Diluent = 70 : 30, a=80)

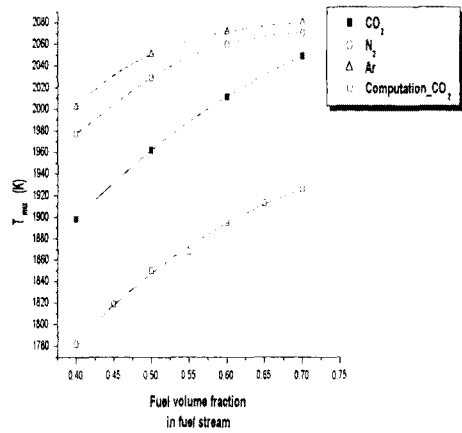


Fig.3-21 Maximum temperature as a function of fuel volume fraction in fuel stream (a=80)

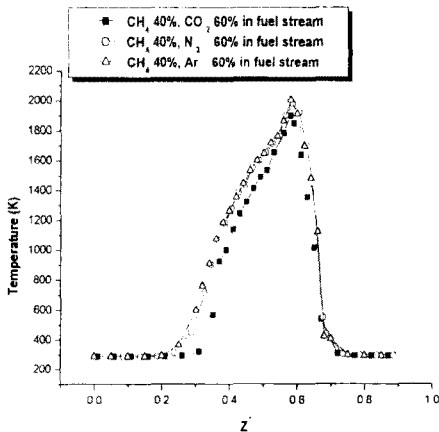


Fig.3-20 Temperature profiles
(CH₄ : Diluent = 40 : 60, a=80)

Fig.3-16 ~ Fig.3-20은 CH₄-Air 화염에서 연료분을 변화에 따른 온도를 측정 한 결과이다. 여기에 나타낸 결과들은 모두 온도보정을 한 경우이며 온도보정을 한 경우와 하지 않은 경우에 대한 비교를 Fig.3-15에 나타내었다. Fig.3-15에 나타낸 바와 같이 저온영역에서는 온도의 차이가 작으나, 고온 영역에서는 최고 100K 정도의 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

Fig.3-16 ~ Fig.3-18은 각각의 희석제 (CO₂, N₂, Ar)에 대하여 연료의 Volume fraction을 70%인 경우와 40%인 경우의 temperature profile을 나타낸 것이다. 여기서 Z* 축은 화염의 최고 온도와 두께를 비교하기 위해 shift된 좌표축이므로 노즐 사이의 간격을 나타내지는 않는다. 그림에 나타낸 바와 같이 희석제에 상관없이 연료의 분율이 줄어들면 전체적으로 화염의 온도가 떨어지고 화염의 두께가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig.3-19은 연료의 Volume fraction

이 70%인 경우 세 가지 희석제에 대한 temperature profile을 나타낸 것이며 Fig.3-20는 연료의 Volume fraction이 40%인 경우이고 두 그림을 비교하여 보면 CO₂의 경우가 다른 희석제의 경우에 비하여 첨가량이 늘어날수록 화염의 온도나 화염의 volume이 현저하게 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig.3-21에 연료분율에 따른 화염의 최고 온도의 변화를 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 CO₂의 경우가 다른 희석제의 경우에 비하여 첨가량이 늘어날수록 온도가 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

절대값에서는 100K 정도의 오차를 보이고 있지만 온도가 떨어지는 기울기 측면에서는 계산결과(SMOOKE code)와 실험결과가 매우 일치함을 보이고 있다.

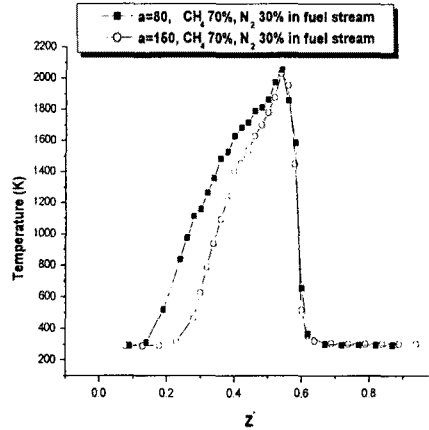


Fig.3-22 Temperature profiles
(CH₄ : N₂ = 70 : 30)

3.3.2 Strain rate 변화에 따른 화염 온도 변화

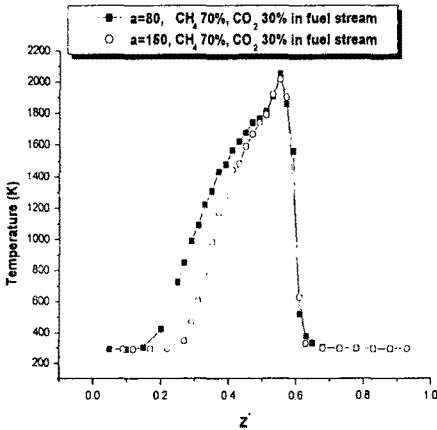


Fig.3-21 Temperature profiles
(CH₄ : CO₂ = 70 : 30)

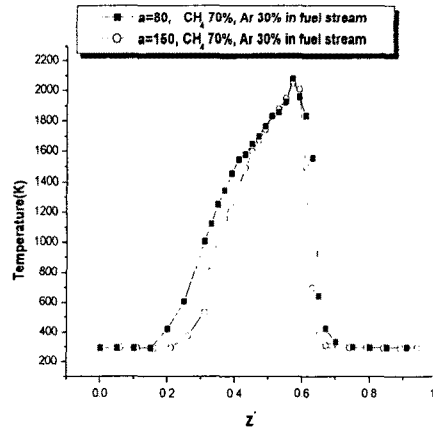


Fig.3-23 Temperature profiles
(CH₄ : Ar = 70 : 30)

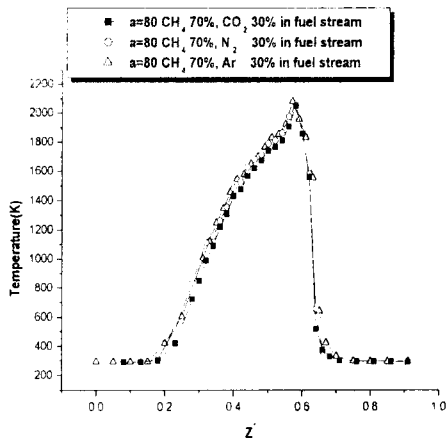


Fig.3-25 Temperature profiles
(CH₄ : Diluent = 70 : 30, a=80)

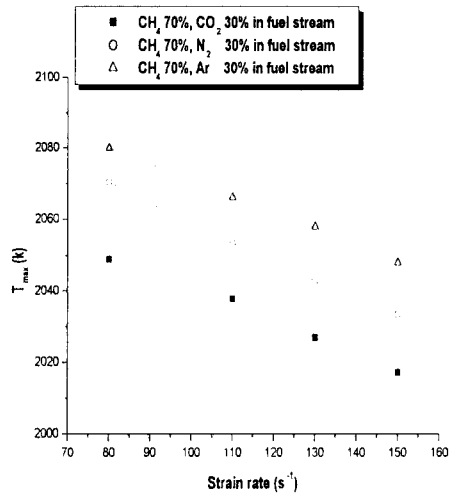


Fig.3-27 Maximum temperature as a function of strain rate
(CH₄ : Diluent = 70 : 30)

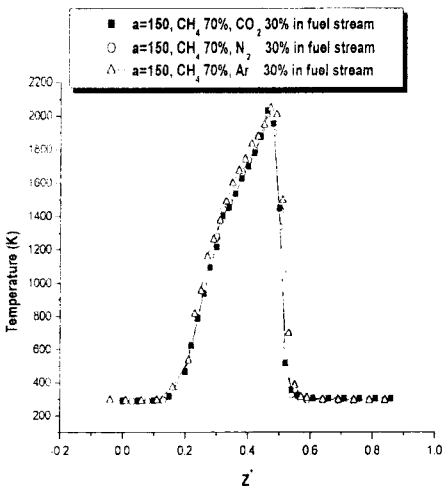


Fig.3-26 Temperature profiles
(CH₄ : Diluent = 70 : 30, a=150)

Fig.3-22 ~ Fig.3-26은 연료와 희석제의 혼합비를 고정시킨 상태에서 Strain rate의 증가에 따른 Temperature profile을 나타낸 것이다. Fig.3-22 ~ Fig.3-24은 각각의 희석제에 대하여 Strain rate의 증가에 따른 화염의 온도를 측정 한 것인데 세 경우 모두 Strain rate가 증가할수록 화염의 온도가 떨어지고 화염의 두께가 작아짐을 볼 수 있다. Fig.3-25과 Fig.3-26은 각각 Strain rate가 80인 경우와 150인 경우 세 가지 희석제간의 차이를 알아보기 위하여 나타낸 것인데 두 그림을 비교하여 보면 Strain rate가 증가할 경우 희석제 종류의 차이에 의한 특이한 점은 나타나지 않았다.

일정한계 이내에서는 Strain rate의 증가가 반응에 필요한 산화제와 연료성분의 공급을 원활히 하고 혼합을 증가시켜 화염의 안정에 도움을 주지만 그 한계 (Strain rate :30~40)를 넘어서면 Strain rate의 증가는 반응에 필요한 체류 시간을 줄이는 효과를 가져오기 때문에 화염이 불안정해지는 원인이 되며 화염의

두께가 얇아지는 것도 여기에서 비롯된다.

Fig.3-27는 화염의 최고 온도를 Strain rate의 변화에 따라 나타낸 것이다. 세 가지 희석제의 경우가 모두 Strain rate가 증가할 수록 온도가 조금씩 낮아짐을 볼 수 있으며 희석제간의 차이는 크게 나타나지 않았다.

가는 화염의 두께를 작아지게 만들고 화염의 온도를 떨어지게 만드는데 유동 속도의 증가가 반응에 필요한 잔류시간을 줄이게 되어 소염에 가까워지게 된다. CO₂ 첨가의 경우에 혼합율이 일정한 상태에서의 Strain rate의 증가는 N₂, Ar을 첨가한 경우와 비교하여 볼 때 화염의 두께와 온도의 변화에 있어서 그 변화 정도가 비슷함을 알 수 있다.

4. 결론

CH₄/Air/CO₂ 대항류 확산화염의 소염 특성과 구조적 특징을 파악하기 위한 이상의 실험으로부터 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CO₂ 첨가에 의한 화염의 소염 특성은 전체적으로 N₂, Ar에 비하여 적은 양을 첨가 하여도 소염조건에 다다르게 되며 결과적으로 화염이 존재하기 위한 임계 연료농도, 임계 산소농도의 값이 N₂, Ar을 첨가한 경우 보다 높아진다.

2. 소염특성에 있어서 CO₂를 첨가한 경우가 N₂, Ar을 첨가한 경우와 열적 분율(Qd)에 있어서 같은 값을 나타내는 것으로 보아 화염의 소염은 주로 thermal effect로 설명이 가능하다고 여겨진다..

3. CO₂ 첨가에 의한 연료분율의 하락은 화염의 두께를 작아지게 만들고 화염의 온도를 떨어지게 하는 일반적인 결론을 거시적으로 관찰할 수 있었으며 온도 측정의 결과 그 변화 정도가 다른 희석제에 비하여 상대적으로 큼을 알 수 있었다. CO₂ 첨가에 의한 급격한 온도 하락은 다른 희석제의 경우와 비교하여 볼 때 소염의 경우처럼 thermal effect만으로는 설명하기 어려우며 이후의 연구에 있어서 화염에서 발생하는 화학종들의 농도를 정량적으로 계측하는 것이 필요하다고 본다.

4. 같은 혼합분율에서 Strain rate의 증

참고문헌

- [1] Morel, T., " Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", Journal of Fluid Engineering, pp. 225-233, June, 1975
- [2] Seshadri, K., and Williams, F. A., Int. J. Heat Mass Transfer 21 pp.251-253(1978)
- [3]Holeman, J, P." Experimental Methods for Engineers", McGraw-Hill, 5th ed.(1989)
- [4]Incropera, F. P. and DeWitt, D. P. "Introduction to Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc, 3rd Ed.(1996)
- [5]Tsuji, H., Yamaoka, I., Eleventh Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1967, pp.979-984
- [6]Tsuji, H., and Yamaoka, I., Twelfth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1969, pp.979-984
- [7]Tsuji, H., and Yamaoka, I., Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1971, pp.723-731
- [8]Ishizuka, S., and Tsuji, H., Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1981, pp.695-703
- [9]Tsuji, H., Progress in Energy and Combust. Sci. 8 pp.93-119 (1982)
- [10] I. K. Puri and K. Seshadri, Combustion and Flame 65

84-20. presented at the Western States Section of the Combustion Institute, 1984 Spring Meeting, University of Colorado, Boulder, Co., April 2-3 1984

[12] Liew, S. K., Bray, K. N. C., and Moss, J. B., Combust. Flame 56 pp.199-213(1984)

[13] Dixon-Lewis, A., David, T., Gaskell, P. H., Fukutani, S., Jinno, H., Miller, J. A., Kee, R. J., Smooke, M. D., Peters, N., Effelsberg, E., Warnatz, J., and Behrendt, F., Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1984, pp1893-1904

[14] Douglas Hainsworth, M. Pourkashanian, Andrew P. Richardson, Joanne L. Rupp and Alan Williams, Fuel Vol. 75 No.3 pp.393-396 1996

[15] 이승로, "CO₂ 첨가가 대향류 확산 화염의 구조 및 NO_x 생성에 미치는 영향" 인하대학교 석사학위 논문(2000)

[16] Bilger, R. W., Turbulent Reacting Flows (P. A. Libby and F. A. Williams, Eds.), Topics in Applied Physics 44, Springer-Verlag, New York, 1980, pp.65-113

[17] Peters, N., Progress in Energy and Combust. Sci. 10 pp319-339 (1984)

[18] Peters, N., Combust Sci. Tech. 30 pp.1-17 (1983)