

< 논문 >

마이크로 연소기에서 발생하는 열 소멸과 화학 소멸 현상 (II)

- SiO_x (x ≤ 2) 플레이트의 물리, 화학적 성질이 소멸에 미치는 영향 -

김규태* · 이대훈** · 권세진 †

(2005년 8월 9일 접수, 2006년 3월 25일 심사완료)

Thermal and Chemical Quenching Phenomena in a Microscale Combustor (II) - Effects of Physical and Chemical Properties of SiO_x (x ≤ 2) Plates on Flame Quenching -

Kyu Tae Kim, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon

Key Words : Thermal Quenching(열 소멸), Chemical Quenching(화학 소멸), Oxygen Vacancy(산소 공공), Heat Loss(열 손실), Quenching Distance(소멸 거리)

Abstract

In order to realize a stably propagating flame in a narrow channel, flame instabilities resulting from flame-wall interaction should be avoided. In particular flame quenching is a significant issue in micro combustion devices; quenching is caused either by excessive heat loss or by active radical adsorptions at the wall. In this paper, the relative significance of thermal and chemical effects on flame quenching is examined by means of quenching distance measurement. Emphasis is placed on the effects of surface defect density on flame quenching. To investigate chemical quenching phenomenon, thermally grown silicon oxide plates with well-defined defect distribution were prepared. Ion implantation technique was used to control defect density, i.e. the number of oxygen vacancies. It has been found that when the surface temperature is under 300°C, the quenching distance is decreased on account of reduced heat loss; as the surface temperature is increased over 300°C, however, quenching distance is increased despite reduced heat loss effect. Such aberrant behavior is caused by heterogeneous surface reactions between active radicals and surface defects. The higher defect density, the larger quenching distance. This result means that chemical quenching is governed by radical adsorption that can be parameterized by oxygen vacancy density on the surface.

기호설명

δ : 화염 면 두께
 d : 소멸 거리
 k : 열 전도도
 V : 체적
 T : 온도

\dot{Q} : 체적 에너지 생성율
 \dot{m} : 체적 질량 생성율
 Δh_c : 연소 발생 열

하첨자

cond : 전도
 c : 연소
 b : 기연 가스
 w : 벽면
 F : 연료
 total : 전체

* 회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학과
 ** 회원, 한국기계연구원 청정환경기계연구센터
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
 E-mail : trumpet@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3721 FAX : (042)869-3710

1. 서론

연소기의 크기가 화염면 두께에 준하는 마이크로 연소기는 높은 표면적 대 체적비로 인하여 매크로 스케일의 일반 연소기와 비교하여 독특한 연소 특성을 가진다. 스케일의 감소는 화염-표면 상호작용에 의한 열 손실과 라디칼 소멸, 비 평형 특성 등으로 인하여 화염 전파 특성의 변화를 가져온다.^(1,2) 특히, 벽면을 통한 과도한 열 손실에 의한 열 소염(Thermal quenching)과, 라디칼과 벽면 결합과의 흡착 반응에 의한 화학 소염(Chemical quenching) 현상이 안정적인 화염 전파를 방해하는 주요 원인이다.⁽³⁾

Weinberg^(4,5) 등은 벽면 열손실에 의한 소염을 방지하기 위하여 고온의 기연 가스를 이용하여 미연 가스를 예열시키는 열 재순환(Heat recirculation) 방법을 이용한 연구로부터, 가연 한계를 증가시킬 수 있음을 확인하였다. Norton⁽⁶⁾ 등과 Leach⁽⁷⁾ 등은 2 차원 CFD 수치해석을 통하여 마이크로 연소를 가능케 하려면, 벽면 열전도도와 두께를 고려하여 열손실 감소시켜야 함을 확인하였다. Ju^(8,9) 등은 메조스케일(Mesoscale)의 채널을 전파하는 예혼합 화염의 전파 및 소염 특성을 해석적, 실험적 방법으로 고찰하였다. 열 재순환에 의한 벽면 열손실과 벽면-화염 상호작용에 초점을 둔 연구로부터, 채널의 폭이 줄어들며 따라서 새로운 화염 영역이 나타남을 확인하였다. 한편, Ronney⁽¹⁰⁾는 해석적 방법을 이용하여 대항류 열 재순환 버너의 열전달 특성을 연구하였다.

위에서 언급한 마이크로 연소에 대한 수치적, 해석적 접근뿐 아니라, 다양한 실험적 연구가 수행되었다. Miesse⁽¹¹⁾ 등은 0.75mm 채널 폭의 Y-모양 마이크로 버너를 이용하여 층류 비예혼합화염의 불안정성에 관한 연구를 수행하였으며, Ahn⁽¹²⁾ 등은 대항류 형태의 “Swiss Roll” 버너를 이용한 실험을 수행하였다. 한편, 화학 소염 방지를 위한 특별한 표면 처리를 통하여 일반적인 연료-산화제의 소염 거리 이하의 최소 길이를 갖는 미세 채널 사이를 전파하는 마이크로 연소기가 Masel⁽¹³⁾ 등에 의해 개발되었다.

표면 효과가 화염의 안정성 및 벽면 열유속에 미치는 영향에 관한 연구가 Aghalayam⁽¹⁴⁾ 등과 Sloane⁽¹⁵⁾ 등에 의해 수행되었다. 이들은 기체상의 화학 반응 메커니즘과 벽면에서의 라디칼 재결합

Table 1 Ion implantation conditions

| Wafer No | Ion species | Energy (keV) | Dose (ions/cm ²) | Incident angle |
|----------|-----------------|--------------|------------------------------|----------------|
| 1 | No implantation | | | ---- |
| 2 | Ar ⁺ | 3 | 1E14 | 60° |
| 3 | Ar ⁺ | 4 | 1E14 | 60° |
| 4 | Ar ⁺ | 5 | 1E14 | 60° |

반응 메커니즘의 수치적 모사를 통하여, 화염-표면 상호작용에 의한 열화학적 영향이 연소기의 점화 및 소염에 영향을 미친다는 결론을 도출하였다. 위의 여러 연구로부터 연소기의 스케일 감소에 의해 필연적으로 발생하는 벽면 열손실에 의한 마이크로 연소기내에서의 화염 전파 및 소염 특성에 대한 연구가 다양하게 수행되었음을 알 수 있다. 열 소염 문제를 해결하기 위한 방안으로 열재순환 방법을 이용하여 가연 한계를 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 하지만 반응 영역에서 연소 반응에 의해 생성되는 라디칼들이 연소기 벽면과 반응하여 발생하는 화학 소염 현상의 물리적 메커니즘에 대한 연구가 부족한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 라디칼-표면 상호작용에 의한 화학 소염 현상을 실험적으로 고찰하고자 한다.

고체 표면에서 라디칼의 흡착점 역할을 하는 것은 산소 공공과 결정립계이다. 따라서 산소 공공 혹은 결정립계의 분포 정도와 소염간의 상관 관계를 관찰하면 라디칼-표면 상호 작용에 대한 더 깊이 이해할 수 있을 것이다. 표면 점 결합인 산소 공공의 분포 밀도가 화학 소염에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해 이온 주입법(Ion implantation)을 이용하였다.⁽¹⁶⁾ 실리콘 다이옥사이드 웨이퍼 위에 낮은 에너지의 아르곤 이온을 조사시키면, 표면에서 산소 원자만 선택적으로 제거된다. 제거된 산소 원자가 실리콘 옥사이드 표면에 산소 공공 결합을 생성하며, 생성물은 이온 에너지의 크기에 비례하여 증가한다. 제작한 SiO_x(x≤2) 플레이트의 이온 주입 조건을 Table 1에 제시하였다.

플레이트의 교환과 온도 조절이 가능한 실험 장치를 구성하여, 플레이트의 온도를 상승시키면서 소염 거리 측정 실험을 수행하였다. 측정된 소염 거리 결과로부터, 플레이트의 온도 구간에 따라서 소염의 모드가 구분된다는 것을 확인하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 제시하였다. 버너와 히터의 확대 사진은 Fig. 2에 나타내었다. 버너는 300 cpsi(cells per square inch) 규격의 세라믹 허니컴을 가공하여 만들었다. 총 세 열로 이루어져 있으며, 각 셀의 면적은 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 이다. 연료-산화제 혼합 가스는 세 열 중에서 가운데 열을 통하여 공급된다. 버너의 양 끝단에는 외부 공기의 유입에 의해 발생하는 유동에 의한 화염 불안정성을 막기 위해 플랜지를 만들었다. 따라서 예혼합 화염은 버너 출구에서 두개의 벽면에 의해 갇힌 형상이다. 두 플레이트 사이의 간격은 디지털 마이크로 미터와 1 축 트레이버스를 이용하여 $10 \mu\text{m}$ 의 정확도로 간격 조절이 가능하다.

Table 1에 제시한 이온 주입 조건에 의해 제작된 $\text{SiO}_x(x \leq 2)$ 플레이트는, 고온에 대한 내구성이 좋고 열팽창률이 매우 작은 세라믹 계열의 접착제를 이용하여 알루미늄아 블록 홀더에 붙였다. 알루미늄 홀더의 중앙에는 열전대의 설치가 가능하도록 길이 방향으로 직경 1 mm의 홈을 만들었다. 플레이트-홀더 블록을 온도 조절이 가능한 히터에 장착하였다. 플레이트의 온도는 K-타입 열전대를 이용하여 측정하였으며, 최고 $850 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 가열할 수 있다. 연료-산화제는 이론 당량비의 메탄-공기 예혼합기를 이용하였으며, Bronkhorst사의 MFC를 이용하여 총 공급 유량을 600 sccm으로 설정하였다. 이 경우, 버너 출구에서 유동의 레이놀즈 수는 43으로 층류 영역에 속한다.

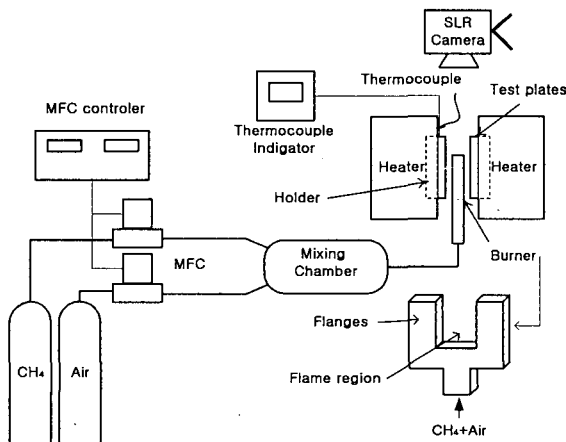


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 실험 방법

표면 결함 밀도가 조절된 실리콘 옥사이드 플레이트를 히터에 장착한 다음, 플레이트의 간격이 10 mm 일 때 온도가 설정 온도로 정상 상태에 도달하면, 플레이트의 간격을 줄이면서 소염 거리를 측정하였다. 같은 방법으로 100 $^\circ\text{C}$ 부터 600 $^\circ\text{C}$ 까지 100 $^\circ\text{C}$ 간격으로 증가시키면서 각 경우에서 총 10회 소염 거리를 측정하였다. 실험 장치 위에 디지털 카메라(Fuji FinePix S2Pro)를 설치하여 벽면 효과에 의해 발생하는 화염의 불안정한 거동을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 좁은 벽면 사이를 전파하는 화염 형상

아르곤 이온 주입을 하지 않은 실리콘 옥사이드 플레이트의 온도를 100 $^\circ\text{C}$ 로 올린 상태에서, 두 플레이트의 간격을 줄이면서 찍은 화염 사진을 Fig. 3에 제시하였다. 두 플레이트의 간격이 충분히 넓은 경우 (a)에는 화염이 버너 출구 전체에 걸쳐서 안정적으로 전파하였다. 간격이 점차 줄어들면, 화염의 일부분이 찌그러진 형태를 보이다가, 중간 부분에서 국부적인 소염이 발생했다(c-d). 간격이 더 줄어들면, 버너 출구의 양 끝단에 두개의 화염이 불안정하게 움직이다가 소염이 발생했다.

Fig. 3의 (c-d)에서 화염 중앙부에서 국부적인 소염이 먼저 발생하는 이유는 화염의 중앙 부분이 플레이트와 접촉 면적이 넓기 때문에 손실되는 열 유속이 크기 때문이다. 화염 양 끝단의 경우 공기 층을 인접하고 있기 때문에 열손실의 영향이 상대적으로 작아서, 더 좁은 벽면 간격에서도 화염이 존재할 수 있다.

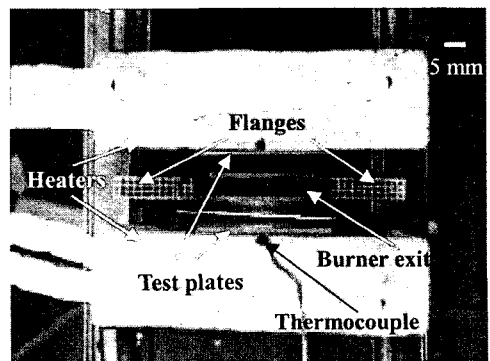


Fig. 2 Top view of the burner and heaters

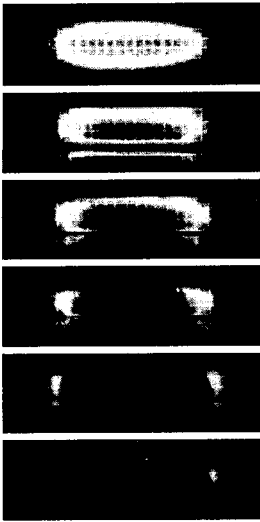


Fig. 3 A series of flame photographs when the temperature of virgin SiO₂ plates is 100 °C. The distances of two plates are 4.95, 4.89, 4.85, 4.79, 4.75, 4.70mm in downward order

3.2 플레이트 온도 300 °C 이하에서의 소염 특성
이온 주입법을 이용하여 제작한 플레이트를 Fig. 2 에 제시한 실험 장치에 장착하여 소염 거리 측정 실험을 하였다. 플레이트의 온도를 100 °C에서 600 °C까지 100 °C간격으로 증가시키면서, 두 플레이트 사이를 전파하는 메탄-공기 예혼합 화염의 거동을 관찰하고 소염 거리를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 4 에 제시하였다. 전체적으로 플레이트 온도의 증가에 따라서 소염 거리가 감소하는 구간과 증가하는 구간으로 구분될 수 있다. 위 결과로부터 소염 거리 감소 구간을 Regime A, 증가 구간을 Regime B로 정의 하였다.

Regime A에서는 플레이트의 온도가 300 °C까지 증가하는 동안 모든 플레이트의 소염 거리가 감소하였다. 이것은 플레이트의 온도 증가가 벽면을 통한 열손실을 감소시켰기 때문이다. 또한 각 온도 조건에서 모든 플레이트의 소염 거리가 거의 같은 값을 나타냈다. 이 결과는 열 소염 구간인 Regime A에서는 플레이트의 물리 화학적 성질이 소염에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 Miesse⁽¹⁷⁾ 등의 연구 결과와 일치한다.

3.3 플레이트 온도 300 °C 이상에서의 소염 특성
Regime B에서는 플레이트 온도가 증가함에 따라서 소염 거리가 증가하는 구간이 나타났다. 플레이트의 온도가 더 증가하여 벽면을 통해 손실되

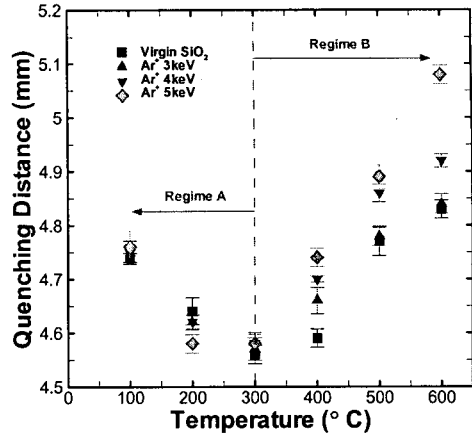


Fig. 4 Quenching distances of virgin and Ar⁺ ion-implanted plates with temperature

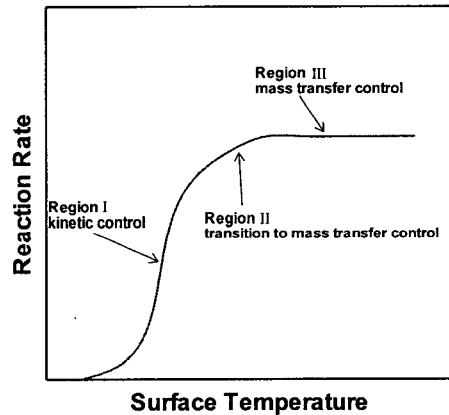


Fig. 5 Surface reaction rate as a function of surface temperature

는 열량은 감소하였음에도 불구하고 소염 거리가 증가하는 것은, 이 온도 구간에서는 더 이상 열적인 영향이 소염을 결정하지 않음을 의미한다. 플레이트 표면의 온도가 높아지면 라디칼들의 흡착 반응이 활성화되어,⁽¹⁸⁾ 연소 반응에 의해 생성된 라디칼들이 표면에 화학 흡착 후 재결합하는 반응이 나타난다. 따라서 연소 반응의 체인이 유지될 수 없기 때문에 안정적인 화염 전파가 불가능해진다. 즉, 라디칼과 표면 결합간의 이상 화학 반응에 의한 화학 소염 현상의 발생으로 인해, 플레이트의 온도가 증가함에도 불구하고 소염 거리는 증가한다.

Regime B에서는 Regime A에서와는 달리 소염 거리의 증가 기울기가 플레이트 별로 다르게 나타났다. 아르곤 이온 주입 처리를 거친 플레이트의

Table 2 Low temperature reaction mechanisms of methane

| Reaction mechanisms | | A | b | E |
|--|-----|---------|-----|--------|
| CH ₄ +O ₂ →CH ₃ +HO ₂ | R1 | 7.90E13 | 0.0 | 234.30 |
| CH ₃ +O ₂ →CH ₂ O+OH | R2 | 3.60E10 | 0.0 | 37.43 |
| OH+CH ₄ →H ₂ O+CH ₃ | R3 | 1.60E6 | 2.1 | 10.29 |
| OH+CH ₃ O→H ₂ O+HCO | R4 | 3.43E9 | 1.2 | 1.88 |
| CH ₂ O+O ₂ →HCO+HO ₂ | R5 | 2.00E13 | 0.0 | 163.18 |
| HCO+O ₂ →CO+HO ₂ | R6 | 7.58E12 | 0.0 | 1.72 |
| HO ₂ +CH ₄ →H ₂ O ₂ +CH ₃ | R7 | 1.81E11 | 0.0 | 78.24 |
| HO ₂ +CH ₃ O→H ₂ O ₂ +HCO | R8 | 1.47E13 | 0.0 | 63.60 |
| OH→ wall | R9 | | | |
| CH ₂ → wall | R10 | | | |
| HO ₂ → wall | R11 | | | |

$k=A T^b \exp(-E/RT)$, unit: cm³, mol, kJ

소염 거리가 아무런 처리를 거치지 않은 플레이트보다 더 큰 값으로 측정되었으며, 이온 주입 처리한 플레이트 사이에서도 이온 에너지의 크기가 큰 플레이트의 소염 거리가 더 큰 값을 가졌다. X-선 광전자 분광법을 이용한 표면 화학 조성 분석 결과,⁽¹⁶⁾ 높은 이온 에너지에 의해 아르곤 이온 주입 처리한 플레이트는 이온 에너지가 낮은 플레이트보다 산소 원자의 선택적 제거율이 더 높기 때문에, 이온 주입 후 생성되는 산소 공공의 밀도가 더 높게 나타났다. 즉, 이온 에너지가 클수록 SiO_x(x<2)에서 x 값이 더 작아지기 때문에 산소 공공의 수는 더 증가하게 된다. 따라서 플레이트 표면의 결합중에서 라디칼의 흡착점 역할을 하는 산소 공공의 밀도에 의해 화학 소염 현상이 결정됨을 알 수 있다.

Fig. 4 에서 virgin SiO₂ 와 3 keV 의 비교시 400 °C 에서는 차이가 크나 500 °C 와 600 °C 에서 차이가 줄어드는 이유는 아르곤 이온주입을 통하여 제작한 실리콘 옥사이드 플레이트가 연소 실험 과정에서 부분적으로 재산화(Re-oxidation)반응을 겪기 때문이다. 특히, 낮은 이온 에너지(3 keV)로 처리한 플레이트의 경우, 표면 결합인 산소 공공 밀도가 낮기 때문에 플레이트가 고온일 때 이와 같은 현상이 발생한다.

이상 화학 반응이 발생할 때, 고체 표면에서의 정상상태 반응물은 반응물이 확산과정에 의해 고체 표면으로 전달되는 속도보다 클 수 없다. 즉, 단순히 표면의 반응성을 증가시킴으로써 특정 한계 이상으로 반응물을 증가시키는 것이 불가능하다.⁽¹⁹⁾ 이상 화학 반응에서 나타나는 이와 같은 현

Table 3 Langmuir-Hinshelwood surface reaction mechanisms, where * means vacant surface sites and H* means an adsorbed H radical

| Radicals | Reaction Mechanisms |
|-----------------|----------------------------------|
| H | H + * → H* |
| | 2H* → H ₂ + 2* |
| O | O + * → O* |
| | 2O* → O ₂ + 2* |
| OH | OH + * → OH* |
| | 2OH* → H ₂ O + O* + * |
| | 2O* → O ₂ + 2* |
| HO ₂ | HO ₂ + 2* → OH* + O* |
| | 2OH* → H ₂ O + O* + * |
| | 2O* → O ₂ + 2* |

상을 질량 전달 한계(Mass transfer limitation)라 한다. 고체 표면의 반응률과 온도와의 관계를 Fig. 5 에 제시하였다. 고체 표면의 온도가 특정 온도 이상이 되면 반응률이 급격히 상승하는 구간(Region I)이 나타난다. 이 구간에서는 반응물이 운동학적으로 제어되는 구간이다. 온도가 더 증가하면 반응률이 더 이상 변화하지 않고 일정하게 유지되는 구간(Region III)이 나타난다. 이 구간에서는 이상 화학 반응의 운동학이 아닌, 반응물의 질량전달률에 의해 반응이 제어되기 때문에 온도의 증가에도 불구하고 반응률은 더 이상 증가하지 않는다.

Fig. 4 의 Regime B 에서 플레이트의 온도가 증가함에 따라서 소염 거리가 증가하는 현상은 이상 화학 반응의 운동학에 의해 반응물이 제어되기 때문이다. 플레이트의 온도 증가에 따라 표면 반응률은 지수적으로 증가하여 이상 화학 반응에 의한 라디칼 소염을 가속시키기 때문에 소염 거리가 증가하게 된다.

3.4 메탄 연소 반응 메커니즘

메탄 연소 반응은 저온 메커니즘과 고온 메커니즘으로 구분되어 질 수 있다.⁽²⁰⁾ 대표적인 저온 반응 메커니즘을 Table 2 에 제시하였다. 반응 (R1)에서 메탄 분자가 산소 분자와 산화 반응하는 연쇄창시반응(Chain initiation reaction)에 의해 CH₃ 와 HO₂ 라디칼이 생성된다. (R2)~(R4)와 (R6)~(R8) 반응에 의해 OH, CH₃, HCO, HO₂ 라디칼들이 연쇄이동반응(Chain propagation reaction)에 참여하여 연소 반응이 유지된다.

메탄 연소 반응의 저온 메커니즘에서는 반응성이 높은 H 라디칼이 생성되지 않는다는 점과, 유일한 연쇄분지반응(Chain branching reaction)인 (R5)는 높은 활성화 에너지(163.18 kJ/mol)를 가지고 있으며, 다소 안정적인 HCO 와 HO₂ 라디칼을 생성시킨다

는 특징이 있다. 그리고 반응 (R7)과 (R8)에 의해 생성된 H₂O₂의 분해반응이 나타나지 않기 때문에 급속한 화학 반응이 불가능하다. H₂O₂의 분해 반응은 OH 라디칼을 생성시켜 연소 반응을 가속화시키는 역할을 하나, 900K 이하의 낮은 온도에서는 H₂O₂ 분해 반응이 발생하지 않는다.⁽²⁰⁾

Fig. 4의 Regime A와 B에서 발생하는 메탄 연소 반응은 Table 2에 제시한 저온 메커니즘의 지배를 받는다. Regime B에서 열손실의 영향은 Regime A보다 감소하였지만, 라디칼의 밀도를 증가시키는 연쇄분지반응(R5)에 의해 생성되는 라디칼의 수밀도가 작기 때문에 벽면에서 라디칼 소멸로 인해 소멸 거리는 증가한다. 연쇄분지반응과 연쇄이동반응에 의해 생성된 라디칼들은 (R9)~(R11)의 벽면정지반응(Chain termination reaction)에 의해 벽면에서 소멸된다. 연소 반응에서 중요한 역할을 담당하는 H, OH, O, HO₂ 라디칼의 표면 반응 기구를 Table 3에 제시하였다. 기체상의 다른 안정적인 분자와 충돌하여 활성을 상실하는 기상정지반응도 발생하지만, 표면적 대 체적 비가 높은 연소 환경에서는 벽면에서의 라디칼 소멸률이 더 높게 나타난다.

3.5 열 소멸 모델

열 소멸에 대한 대표적 연구로 Jarosinski의 연구^(21,22)가 있다. 그는 좁은 채널 안에서 전파하는 메탄-공기 예혼합 화염을 이용하여, 소멸 거리가 화염면 두께의 2~3 배에 이른다는 연구 결과를 보고하였다. 원형 관 내에서 전파하는 화염을 고려한 그의 연구와는 달리, 본 연구에서는 평판 사이를 전파하는 화염을 고려하였기 때문에, Friedman^(23,24)의 소멸식을 이용하였다.

반응 영역에서 화학 반응에 의한 에너지의 생성율과 벽면에서 열전도에 의해 손실되는 열량의 비율이 균형을 이룰 경우, 소멸이 발생한다는 Williams⁽²⁵⁾의 이론을 이용하여 Friedman^(23,24)은 단순화된 소멸 거리 식을 유도하였다. 좁은 벽면 사이를 전파하는 화염의 모습을 Fig. 6에 나타내었다. 두 벽면 사이의 간격을 *d*, 반응 영역의 두께를 δ 라 할 경우, Williams의 이론을 적용하면 체적 에너지 균형을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}V = \dot{Q}_{cond, total} \tag{1}$$

좌항에 있는 체적 에너지 생성률 \dot{Q} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

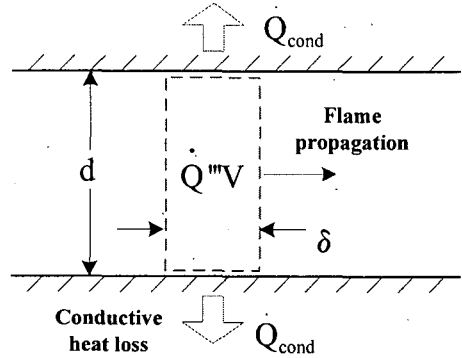


Fig. 6 Schematic of flame quenching between two parallel walls

$$\dot{Q} = -m_F \Delta h_c \tag{2}$$

벽면 열손실은 Fourier의 법칙을 이용하여 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{wall} \tag{3}$$

식 (3)에서 면적 *A*는 $2\delta L$ 로 표현가능하다. 우항의 온도 구배를 선형으로 가정하고, 임의의 상수 *b*를 도입하여 오차를 보정하였다.

$$\left. \frac{dT}{dx} \right| = \frac{T_b - T_w}{d/b} \tag{4}$$

식 (2)~(4)를 식 (1)에 대입한 후 정리하면 다음의 식 (5)의 소멸 거리 식을 유도할 수 있다.

$$d = \sqrt{\frac{2kb(T_b - T_w)}{-m_F \Delta h_c}} \tag{5}$$

식 (5)에서 벽면 온도를 나타내는 *T_w* 값이 증가하면, *T_b - T_w*가 감소하여 소멸 거리는 감소하게 된다. 즉, 식 (5)를 이용하면 Fig. 4에서 열손실에 의해 소멸이 결정되는 Regime A의 소멸 거리를 예측할 수 있다. 그러나, *T_w*의 증가에도 불구하고 소멸 거리가 증가하는 Regime B의 소멸 거리는 예측할 수가 없다.

화학 소멸에 대한 대표적 연구로 Aghalayam⁽¹⁴⁾과 Sloane⁽¹⁵⁾의 연구가 있다. 이들은 기상의 반응식과 표면 반응식들을 함께 고려하여, 수치적 해석을 통해 표면에서 발생하는 화학 소멸을 고찰하

였다. 표면의 반응성을 고려하였을 때, 표면 근처에서 라디칼 밀도 구배가 음으로 나타난다는 결과를 통하여, 특정 표면 조건에서 화학 소염이 활발하게 발생한다는 결론을 도출하였다. 화학 소염에 대한 수치적 접근은 있었으나, 특정 방정식의 형태로 일반화하는 연구는 아직까지 보고된 바 없다. 벽면에서의 라디칼 소멸에 의해 발생하는 화학 소염 현상에 의한 소염 거리를 예측하려면, 벽면의 결합 분포, 라디칼과의 반응도 등의 효과를 포함하는 소염 거리 식이 필요하다.

4. 결 론

좁은 벽면 사이를 전파하는 메탄-공기 예혼합 화염의 열 소염 및 화학 소염 현상을 고찰하였다. 특히, 표면 점 결합인 산소 공공의 분포 밀도가 화학 소염에 미치는 영향을 알아보기 위해 이온 주입법을 이용하여 실리콘 옥사이드 표면에서 산소 원자를 선택적으로 제거하였다. 라디칼의 흡착 점 역할을 하는 산소 공공의 밀도가 조절된 실리콘 옥사이드 플레이트를 이용하여 소염 거리 측정 실험을 수행하였다. 플레이트의 온도를 100°C에서 600°C까지 100°C 간격으로 올리면서 좁은 벽면 사이를 전파하는 메탄-공기 예혼합화염의 거동을 관찰하고 소염 거리를 측정하였다.

위의 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 플레이트 온도가 300°C 이하에서는 온도의 증가에 따라서 소염 거리가 단순 감소하였으며, 플레이트의 종류에 따라서 감소 기울기에 큰 차이가 없었다. 이 온도 구간에서는 벽면을 통한 열손실이 커서 열적인 영향이 우세하기 때문에 표면의 물리적, 화학적 성질이 소염을 결정하지 않는다.

(2) 300°C 이상의 고온에서는 플레이트 온도의 증가에 따라서 소염 거리가 증가하였으며, 각 온도에서 플레이트의 종류에 따라서 소염 거리의 차이가 크게 나타났다. 아르곤 이온 주입 에너지가 큰 플레이트일수록 소염 거리가 크게 나타났다. 플레이트 온도의 상승에도 불구하고 소염 거리가 증가하는 이 영역은 더 이상 열적인 영향이 소염을 좌우하지 않음을 의미한다. 이 구간에서는 라디칼-표면 상호작용에 의한 화학 소염 현상에 의해 소염이 결정되며, 표면 결합인 산소 공공의 밀도가 소염에 중요한 역할을 한다.

(3) 표면적 대 체적비가 높은 연소기 내에서 전파하는 화염의 소염 현상을 정확히 예측하려면, 벽면 열손실의 영향뿐 아니라 라디칼 손실의 영향 또한 고려되어야 한다.

후 기

본 연구는 연소기술연구소(CERC)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Lee, D. H., Choi, K. H. and Kwon, S. J., 2002, "Design and Development of Micro Combustor (I) - Combustion Characteristics in Scale-Downed Combustor," *Trans. of the KSME B*, Vol. 26, No. 1, pp. 74~81.
- (2) Xu, B. and Ju, Y., 2005, "Concentration Slip and Its Impact on Heterogeneous Combustion in a Micro Scale Chemical Reactor," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 3561~3572.
- (3) Fernandez-Pello, A. C., 2002, "Micro-Power Generation Using Combustion: Issues and Approaches," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, p. 883.
- (4) Lloyd, S. A. and Weinberg, F. J., 1975, "Limits to Energy Release and Utilization from Chemical Fuels," *Nature*, Vol. 257, pp. 367~370.
- (5) Lloyd, S. A. and Weinberg, F. J., 1976, "A Recirculating Fluidized Bed Combustor for Extended Flow Ranges," *Combustion and Flame*, Vol. 27, pp. 391~394.
- (6) Norton, D. G. and Vlachos, D. G., 2003, "Combustion Characteristics and Flame Stability at the Microscale: a CFD Study of Premixed Methane/air Mixtures," *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, pp. 4871~4882.
- (7) Leach, T. T. and Cadou, C. P., 2005, "The Role of Structural Heat Exchange and Heat Loss in the Design of Efficient Silicon Micro-combustors," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2437~2444.
- (8) Ju, Y. and Xu, B., 2002, "Theoretical and Experimental Studies on Mesoscale Flame Propagation and Extinction," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2445~2453.
- (9) Ju, Y. and Choi, C. W., 2003, "An Analysis of Sub-Limit Flame Dynamics Using Opposite Propagating Flames Inmesoscale Channels," *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 483~493.
- (10) Ronney, P. D., 2003, "Analysis of Non-adiabatic Heat-recirculating Combustors," *Combustion and Flame*, Vol. 135, pp. 421~439.
- (11) Miesse, C., Masel, R. I., Short, M. and Shannon, M. A., 2005, "Diffusion Flame Instabilities in a 0.75mm Non-premixed Microburner," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2499~2507.
- (12) Ahn, J., Eastwood, C., Sitzki, L. and Ronney, P. D., 2005, "Gas-phase and Catalytic Combustion in Heat-Recirculating Burners," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2463~2472.
- (13) Masel, R. I. and Shannon, M. A., 2001, "Microcombustor Having Submillimeter Critical

- Dimensions," U.S. Patent 6193501.
- (14) Aghalayam, P., Bui, P.-A. and Vlachos, D. G., 1998, "The Role of Radical Wall Quenching in Flame Stability and Wall Heat Flux: Hydrogen-air Mixtures," *Combustion Theory and Modeling*, Vol. 2, pp. 515~530.
- (15) Sloane, T. M. and Schoene, A. Y., 1983, "Computational Studies of End-wall Flame Quenching at Low Pressure: The Effects of Heterogeneous Radical Recombination and Crevices," *Combustion and Flame*, Vol. 49, pp. 109~122.
- (16) Kyu Tae Kim, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon, 2006, "Thermal and Chemical Quenching Phenomena in a Microscale Combustor (I) - Fabrication of SiO_x(x≤2) Plates Using Ion Implantation and Their Structural, Compositional Analysis," *Trans. of the KSME B*, Vol. 30, No. 5, pp. 397~404.
- (17) Miesse, C. M., Masel, R. I., Jensen, C. D., Shannon, M. A. and Short, M., 2004, "Submillimeter-scale Combustion," *AICHE*, Vol. 50, pp. 3206~3214.
- (18) Masel, R. I., 1996, *Principles of adsorption and reaction on the solid surfaces*, John Wiley & Sons, ch. 3.
- (19) Pfefferle, W. C. and Pfefferle, L. D., 1986, "Catalytically Stabilized Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 12, pp. 25~41.
- (20) Glassman, I., 1996, *Combustion*, Academic Press, pp. 90~94.
- (21) Jarosinski, J., 1983, "Flame Quenching by a Cold Wall," *Combustion and Flame*, Vol. 50, pp. 167~175.
- (22) Jarosinski, J., 1986, "A Survey of Recent Studies on Flame Extinction," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 12, pp. 213~225.
- (23) Friedman, R., 1949, "The Quenching of Laminar Oxyhydrogen Flames by Solid Surfaces," *Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena*, p. 110.
- (24) Turns, S. R., 2000, *An Introduction to Combustion*, McGRAW-HILL, pp. 284~286.
- (25) Williams, F. A., 1985, *Combustion Theory*, Addison-Wesley Publishing Company, p. 268.