

화염-표면 상호작용에 의한 예혼합 화염의 열소멸 및 화학소멸에 관한 연구

김규태* · 이대훈** · 권세진****

A Study of Thermal and Chemical Quenching of Premixed Flame by Flame-Surface Interaction

Kyu Tae Kim*, Dae Hoon Lee**, Sejin Kwon****

ABSTRACT

Incomplete combustion due to quenching in a narrow confinement has been a major problem for realization of a reliable micro combustion device. In most micro combustors, effects of flows are absent in the quenching because the flow is laminar and no severe stretch is present. In such circumstance, quenching is caused either by heat loss or by removal of active radicals to the wall surface of the confinement. An experimental investigation was carried out to investigate the relative significance of these two causes of quenching of a premixed flame. A premixed jet burner with a rectangular cross section at the exit was built. At the burner exit, the flame stands between two walls with adjustable distance. The gap between the two walls at which quenching occurs was measured at different wall surface conditions. The results were analyzed to estimate the relative significance of heat loss to the wall and the removal of radicals at the surface. The measurements indicated that the quenching distance was independent of the wall surface characteristics such as oxygen vacancy, grain boundary, or impurities at low temperature. At high temperature, however, the surface characteristics strongly affect the quenching distance, implying that radical removal at the wall plays a significant role in the quenching process.

Key Words : Thermal Quenching, Chemical Quenching, Heat loss, Defect, Oxygen vacancy

기 호 설 명

d : 소멸 거리, m

λ : 열전도도, W/m · K

ϕ_0 : 화학 양론적 몰 분율

C_p : 정압비열, J/mol · K

RR : 반응율, mol/m³ · s

T_q : 두 벽면의 중앙 온도, K

T_f : 단열 화염 온도, K

T_0 : 벽면 온도, K

1. 서 론

마이크로 연소기는 높은 표면적 대 체적비로 인하여 반응역역의 두께가 연소기 특성길이에 준하므로, 벽면 효과가 화염의 거동에 커다란 영향을 미친다. 화염과 표면의 상호작용에 의한 주된 영향은 연소기 벽면을 통한 열손실과 벽면에서의 라디칼 흡착반응이 있다. 연소기 벽면에서 열전

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

** 한국기계연구원 환경기계기술 연구부

*** 한국과학기술원 항공우주공학과

† 연락처, trumpet@kaist.ac.kr

달에 의해 손실되어지는 에너지의 양이 연소반응에 의해 생성되어지는 양보다 크면 소염이 발생하며, 이와 같은 소염 현상을 열소염(Thermal quenching)이라 한다. 열소염 현상은 연소기 외부의 충분한 단열과 열전도도가 낮은 연소기 벽면 재료를 이용함으로써 막을 수 있다. 열손실에 의한 소염 현상을 막을 수 있다 하여도, 또 다른 소염 원인인 화학소염 (Chemical quenching) 현상에 의하여 지속적인 연소반응이 불가능해 질 수 있다. 화학소염이란 연소반응에 의해 생성되어지는 라디칼들이 벽면의 결합에 흡착되어 안정한 분자로 재결합하기 때문에 연소반응의 체인을 유지할 수 없어서 발생하는 소염현상이다. 일반적으로 벽면 근처에서는 이상반응(Heterogeneous reaction)이 우세하며, 표면에서 라디칼의 소멸이 과도한 경우 벽면의 온도와 상관없이 소염이 발생할 수 있다. 화학소염 현상은 벽면 온도가 높은 경우에 주로 발생하며, 라디칼과의 반응성과 같은 표면 고유의 특징이나 표면에 존재하는 결합 분포에 영향을 받는다[1].

소염현상에 대한 연구는 이미 19세기 초에 Davy[2]에 의해 수행되었다. 그는 화염이 좁은 틈을 전파할 때 열손실로 인하여 소염이 발생한다는 사실을 이용하여 역화방지 등(Lamp)을 만들었다. Jarosinski[3,4]는 좁은 벽면사이에서 위 또는 아랫방향으로 전파하는 화염의 소염현상에 대한 연구를 통하여, 벽면으로의 열손실에 의하여 소염이 발생함을 확인하였으며, 채널에서 화염전파 한계가 Peclet수에 의하여 결정된다는 연구결과를 제시하였다. Kuo[5]는 연소반응에 의하여 발생하는 열량에 비해 벽면을 통하여 손실되는 열량이 더 많을 때 소염이 발생한다는 물리적 개념을 이용하여 이론적 열소염 모델을 제시하였다. 또한 복잡한 연소반응 메커니즘을 이용하여 소염현상에 대한 수치적 연구가 여러 연구그룹에 의해 진행되었다[6-9]. 위의 연구들에서는 소염을 일으키는 여러 원인 중에서 열적 영향에 초점을 두었다.

연소기의 크기가 상대적으로 큰 경우에는 화염과 연소기 벽면사이의 상호작용(Flame-surface interaction)의 중요도가 크지 않기 때문에 벽면에서 발생하는 라디칼 재결합반응을 고려하지 않아도 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 연소기가 크기가 초소형화 되면 열손실 뿐 만 아니라 라디칼 파괴현상에 대하여 충분히 고려하여야 한다. Warnatz[10]와 Fernandez[1] 등은 좁은 벽면 사이를 전파하는 화염의 소염현상이 벽면으로의 열전달에 의한 반응을 감소뿐만 아니라 표면에서의 라디칼 소멸로 인하여 발생한다고 기술하고 있다. Aghalayam[11] 등과 Sloane[12] 등은 화염과 벽면과의 상호작용이 화염의 안정성과 벽면 열유

속에 미치는 영향을 고찰하였다. 기체상의 화학반응식과 벽면에서의 라디칼 재결합반응식의 수치적 모사를 통하여 화염-벽면 상호작용의 화학적, 열적 영향이 연소기의 점화 및 소염에 큰 영향을 미침을 확인하였다. Sloane[13] 등은 또 다른 연구에서 실험적 방법을 이용하여 표면반응에 의한 화학소염현상을 연구하였다. 그들은 열적 영향이 화염-표면 상호작용에 의한 화학적 영향보다 소염에 더 중요한 역할을 한다는 결론을 도출했다. 이는 표면온도를 373K의 저온으로 고정하고 실험을 수행하였기 때문에 라디칼 재결합반응이 우세하게 나타나지 않았기 때문이다.

위의 여러 연구에서 주로 열손실에 의해 발생하는 열소염에 대한 실험적, 수치적 연구는 오래 동안 수행되어져 왔음을 알 수 있다. 그러나 연소기 벽면에서의 라디칼 소멸에 의해 발생하는 화학소염 현상에 대한 인식 및 수치적 연구가 소수 이루어 졌으나, 화학소염 현상에 대한 실험적 검증이 적절히 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 마이크로 연소기의 설계를 위해 반드시 고려되어야 할 열소염과 화학소염현상의 물리적 메커니즘의 이해와 두 소염현상의 상대적 역할을 규명함을 연구의 목적으로 하였다.

표면의 특성에 따른 열소염 및 화학소염 현상을 고찰하기 위하여 세 가지 플레이트(스테인리스 스틸 304, 알루미늄, 쿼츠)를 준비하였다. 고체표면에서 라디칼의 흡착점 역할을 하는 것은 표면상에 존재하는 산소공공(Oxygen vacancy)과 같은 점 결함과, 결정립계(Grain boundary)와 같은 계면결합이 있다[14]. 고체 표면에 존재하는 산소공공을 없애기 위하여 플레이트를 고온(1000°C)에서 산소분위기로 열처리하였다. 열처리 한 것(Inert)과 열처리 하지 않은 것(Reactive)을 이용하여, 각 플레이트별로 나타나는 소염거리를 측정 후 비교 분석하였다. 히터를 이용하여 플레이트의 온도를 증가시키면서 열소염 및 화학소염 현상을 고찰하였으며, 특정 온도를 기준으로 열소염과 화학소염현상이 지배적인 영역이 구분되어짐을 확인하였다. 저온에서는 열적 영향이 크기 때문에 표면 고유의 특성이 소염 거리에 영향을 주지 않으나, 고온에서는 표면에서의 라디칼 재결합반응에 의하여 화학소염현상이 발생함을 확인하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 표면 재료 준비

본 연구에서는 표면의 특성에 따른 열소염 및 화학소염현상을 고찰하기 위하여 세 가지 종류의 플레이트를 준비하였다. 플레이트의 재질은 스테

인리스 스틸 304, 알루미늄, 퀴츠를 이용하였으며, 크기는 3mm × 4mm × 1mm이다. 플레이트의 표면 위에 존재하는 유기물 및 금속오염물질을 제거하기 위해서 DI water, 염산, 과산화수소를 6 : 1 : 1의 체적비로 섞은 용액에 플레이트를 담근 다음, Hot plate 위에서 80°C로 10분 동안 가열하였다[15]. 세척 후, 표면에 존재하는 결함(Defects)의 반응성을 더 줄이기 위하여 플레이트를 산소분위기상에서 1000°C로 12시간동안 열처리하였다. 열처리 후에 표면의 상태를 알아보기 위해 SEM 이미지를 촬영해 보았으며, 그 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 스테인리스 스틸 304의 경우 열처리를 하기 전에는 표면상의 몇몇의 결함을 제외하고는 표면이 전반적으로 깨끗한 상태를 나타냈다. 열처리를 한 후에는 고온에서 산소와 고체표면의 철 분자와의 산화반응으로 인하여 알갱이 모양의 산화막이 형성되었음을 확인할 수 있었다. 알루미늄과 퀴츠의 경우는 고온의 열처리 후에 표면의 거칠기가 많이 감소하였음을 확인할 수 있었다.

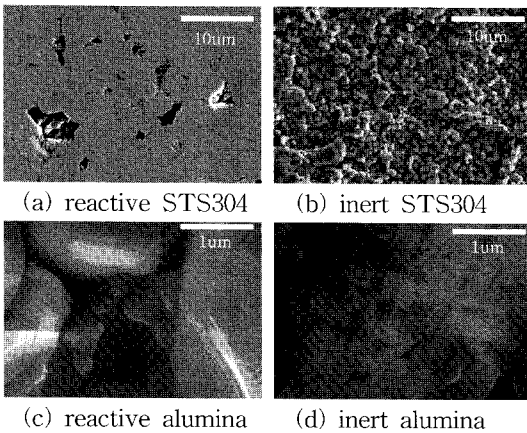


Fig. 1 SEM images of STS304 and alumina plates

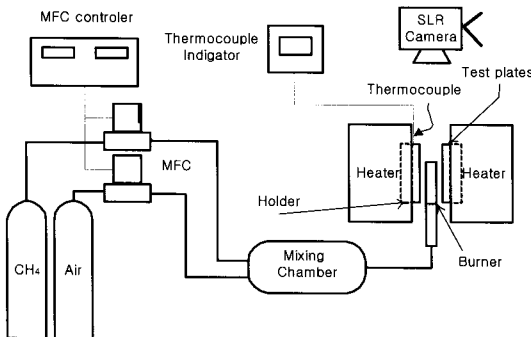


Fig. 2 Schematic of experimental setup

2.2 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에 사용되어진 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 제시하였다. 버너와 히터의 확대 사진은 Fig. 3에 나타내었다. 버너는 300cps(cells per square inch)의 Cordierite 모노리스를 가공하여 만들었다. 총 세 열로 이루어져 있으며, 각 셀의 면적은 1 × 1mm²이다. 연료-산화제의 혼합 가스는 세 열 중에서 가운데 열을 통하여 공급되어진다. 버너의 양단에는 외부 공기가 반응 영역으로 유입됨에 의해 발생하는 화염 불안정성을 막기 위해 플랜지를 만들었다. 따라서 예혼합 화염은 버너 출구에서 두개의 벽면에 의해 갇힌 형상을 띄게 된다. 이 때 벽면 사이의 간격은 디지털 마이크로미터와 1축 트래버스를 이용하여 10µm의 정확도로 간격 조절이 가능하다.

2.1절에서 준비한 플레이트는 고온에 대한 내구성이 높고 열팽창률이 매우 작은 세라믹 계열의 접착제를 이용하여 알루미늄 블록 홀더에 붙였다. 알루미늄 홀더의 중앙에는 열전대의 설치가 가능하도록 길이 방향으로 직경 1mm의 홈을 만들었다. 플레이트-홀더 블록을 온도 조절이 가능한 히터에 장착하였다. 플레이트 표면의 온도는 K-타입 열전대를 이용하여 측정하였으며, 최고 850°C까지 가열할 수 있다. 연료-산화제는 이론 당량비의 메탄-공기 예혼합 가스를 이용하였으며, 공급 유량은 600sccm이다. 이 경우, 버너 출구에서 유동의 레이놀즈 수는 43으로 층류 영역에 속한다.

스테인리스 스틸, 알루미늄, 퀴츠의 세 가지 플레이트를 반응성인 경우와 비반응성인 경우로 구분하여, 총 6가지 플레이트를 바꾸어 가면서 소염 거리 측정 실험을 수행하였다. 플레이트의 온도에 따른 예혼합 화염의 소염 특성을 알아보기 위하여 플레이트의 온도를 500K과 1100K로 고정시킨 다음 소염 거리를 측정하였다.

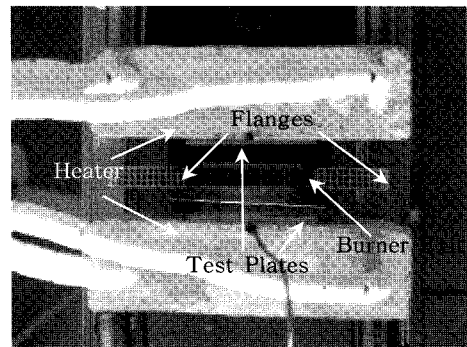


Fig. 3 Top view of the burner and heaters

3. 결과 및 고찰

3.1 라디칼-표면 상호작용

고체 표면에 존재하는 원자는 외부로 향한 방향에 다른 원자가 없기 때문에, 내부원자와 달리 결합력이 불균형인 상태에 있다. 이로 인해 표면의 원자는 내부 원자보다 배위수가 적고, 에너지가 높다. 따라서 표면 원자는 배위되지 않은 위치에 다른 원자나 분자를 받아 들여 에너지를 낮추려고 한다. 표면으로부터 일정 거리에 다른 원자나 분자가 존재하여 계의 에너지가 낮아질 수 있으면 흡착이 일어난다[16-17].

흡착 반응은 반응 메커니즘에 따라서 물리흡착(Physisorption)과 화학흡착(Chemisorption)으로 구분되어 질 수 있다. 물리흡착은 기체분자와 고체 표면의 물리적 결합력에 의한 흡착반응으로 대표적인 예로 반 데르 발스 힘에 의한 흡착반응이 있다. 물리흡착은 결합력이 약해서 기체분자의 끊는점 부근에서 일어나는 현상으로, 분자의 종류와 성질보다 온도와 압력과 같은 열역학적 상태량에 의한 영향이 크다. 반면 화학흡착은 기체분자와 고체표면을 구성하는 분자사이의 화학적 결합력에 의한 결합으로 결합력이 상당히 강하며 선택성을 갖는 특징이 있다. 즉, 특정한 기체분자가 특정한 고체표면에서 흡착반응을 나타냄을 의미한다. 화학흡착은 기체분자의 끊는점보다 훨씬 높은 온도에서 일어나며, 온도가 더 높아지면 탈착(Desorption)이 일어나기도 한다. 그러나 결합력이 큰 경우에는 높은 온도에서도 결합이 그대로 유지된다. 두 흡착반응의 주요 특징을 Table 1에 정리하였다.

연소가 내부에서 연소반응이 일어날 때 벽면 온도는 고온으로 가열된다. 따라서 연소 반응으로 발생한 반응성이 높은 라디칼들과 고온의 표면 사이의 흡착반응은 주로 화학흡착을 통해서 일어날 것이다. 물론 물리흡착 반응도 국부적으로 발생할 것으로 판단되나, 그 비중은 상당히 작을 것이다. 표면에 흡착된 분자들 사이에 전자가 이동하여 결합이 형성되는 화학결합에서는 전자이동으로 생성된 이온간 정전기력(Electrostatic force)이나, 전자공유 혹은 전자체공에 의한 화학결합 생성이 흡착의 원동력이 된다.

3.2 라디칼의 화학흡착 및 재결합 반응

연소반응에 의해 생성된 라디칼들은 확산에 의해 고체 표면으로 이동하여 고체 표면에 존재하는 결합에 흡착된다. 이러한 확산현상의 원동력은 온도구배에 의한 열확산(Thermal diffusion or Soret effect) 또는 라디칼 분자들의 랜덤 운동에 기인한다. 이때 고체 표면에 존재하는 산소

Table 1 Main Characteristics of two kinds of adsorption mechanisms.

Physisorption	Chemisorption
Low heat of adsorption	High heat of adsorption
Non specific	Highly specific
Multilayer adsorption	Monolayer adsorption
Only significant at relatively low temperature	Possible over a wide range of temperature
No electron transfer	Electron transfer

Table 2 Langmuir-Hinshelwood surface reaction mechanisms for H, OH, and O radicals, where * means vacant surface sites and H* means an adsorbed H radical.

Radicals	Reaction Mechanisms
H	$H + * \rightarrow H^*$
	$2H^* \rightarrow H_2 + 2^*$
OH	$OH + * \rightarrow OH^*$
	$2OH^* \rightarrow H_2O + O^* + ^*$
	$2O^* \rightarrow O_2 + 2^*$
O	$O + * \rightarrow O^*$
	$2O^* \rightarrow O_2 + 2^*$

공공(Oxygen vacancy), 결정립계(Grain boundary) 및 기타 금속 오염물과 같은 불순물이 결합 역할을 한다. 화학 흡착된 라디칼들은 재결합(Recombination)과정을 통하여 안정적인 제 3의 분자가 되어 표면으로부터 탈착되어진다. 이러한 일련의 표면 반응 메커니즘은 Langmuir-Hinshelwood 표면 반응 메커니즘에 의하여 설명되어질 수 있다[16]. 메탄-공기 예혼합화염에서는 H, OH, O 라디칼들이 연소반응을 유지하는데 있어서 중요한 역할을 담당한다[18]. Langmuir-Hinshelwood 메커니즘에 기초한 이 세 라디칼의 흡착 및 재결합반응 메커니즘을 Table 2에 제시하였다[11].

3.3 플레이트 온도가 500K일 때의 소염 특성

반응성 STS304 플레이트에 대하여 표면의 온도를 500K으로 유지하고 플레이트의 간격을 점차 줄일 때 나타나는 화염 사진을 Fig. 4에 제시하였다. 플레이트 사이의 간격이 충분히 넓은 경우(a)에는 두 플레이트 사이에서 화염이 안정적으로 존재함을 확인할 수 있다. 간격을 점차 줄임에 따라 화염의 중앙 부분에서 국부적 소염이 발생하였다(d, e). 화염의 가운데 부분은 표면과 직접 접촉하고 있는 부분이 많아서 표면으로의 열손실이 많기 때문이다. 반면, 양 끝단에 존재하는 화염은 상대적으로 열전도가 낮은 공기 및 Cordierite 모노리스를 인접하고 있기 때문에 더 좁은 간격에서도 화염이 안정적으로 유지될 수 있다. 플레이트 사이의 간격을 더 좁히면 화염은 불안정하게 흔들리다가 소염이 일어났다. 사진(b), (c), (d)에서 화염이 비대칭으로 보이는 것은 화염이 플레이트에 반사되어 나타났기 때문이다.

플레이트의 온도가 500K일 때, 플레이트의 종류를 바꾸어 가면서 측정된 소염 거리 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 각 플레이트(STS304, 알루미늄, 퀴츠)에 대하여 반응성과 비반응성 플레이트의 소염거리를 비교하였다. 비반응성 플레이트는 2.1절에서 설명한 방법으로 열처리한 것을 이용하였다. 금속계열인 STS304를 제외한 나머지 것들에서 비반응성 플레이트와 반응성 플레이트의 소염거리가 거의 같은 값으로 나타났다. 금속은 세라믹과는 달리 라디칼과의 반응성이 매우 높기 때문에, 열처리로 인한 효과가 저온에서도 나타남을 확인할 수 있다. 플레이트 종류에 따른 소염거리를 비교해 보면, 소염 거리에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 이것은 저온영역에서 좁은 벽면 사이에 존재하는 화염의 불안정성의 주된 요인이 벽면을 통한 열손실 효과이기 때문이다. 따라서 표면의 온도가 저온인 경우에는, 라디칼이 벽면에 흡착하여 발생하는 화학소염현상보다, 벽면을 통한 열손실에 의한 열소염 현상이 더 중요함을 알 수 있다.

3.4 플레이트 온도가 1100K일 때의 소염 특성

플레이트의 온도를 1100K으로 상승시킨 다음 소염 거리 측정 실험을 수행하였다. 표면의 온도가 고온이 되면 연소반응으로 생성된 라디칼이 표면으로 확산하여 표면에 흡착되어진 다음, 재결합 과정을 통해 안정적인 분자로 결합되어 표면으로부터 탈착되어진다. 따라서 연소기 표면의 온도가 고온일 때는 벽면으로의 열손실에 의해 발생하는 화염 불안정성은 무시할 수 있으나, 라

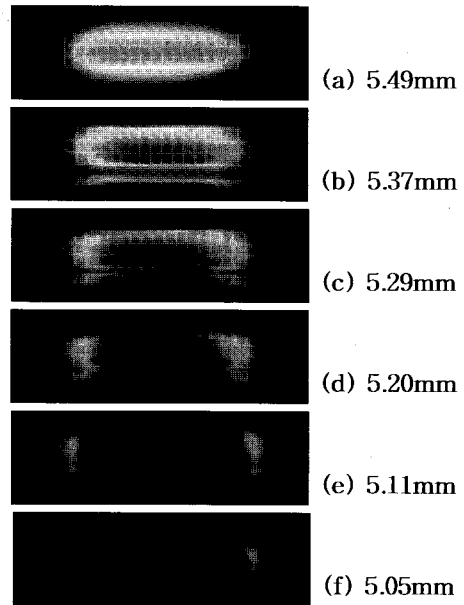


Fig. 4 A series of flame photographs for reactive STS304 plates when the surface temperature is 500K. Given numbers indicate the distance between two plates.

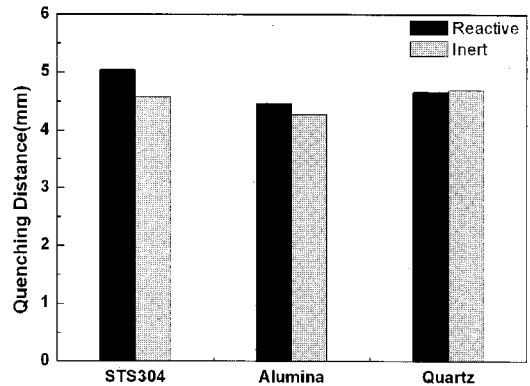


Fig. 5 Quenching distances of both reactive and inert plates at the wall temperature of 500K.

디칼 파괴에 의해 발생하는 화학소염현상으로 인하여 안정적인 화염을 유지하기가 힘들다. 플레이트의 온도가 1100K일 때 각 플레이트의 종류에 따른 소염거리 측정 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 저온실험(500K)과 비교해 보았을 때, 플레이트의 종류에 따라서 소염거리가 확연히 차이나는 것을 알 수 있다. 금속계열인 STS304는 표면의 특성상 라디칼과의 반응성이 높은 편이기 때문에 가장 큰 소염 거리를 나타냈다. 반면에 세라믹계열인 알루미늄과 퀴츠는 STS304보다

상대적으로 작은 소염 거리를 나타냈다. 세라믹은 격자구조가 안정적이고 치밀하여 표면에서 라디칼과의 반응성이 낮기 때문에 화학소염현상에 의한 라디칼 파괴가 금속에 비해 훨씬 적게 발생한다.

고온의 산소분위에서 장시간 열처리를 한 플레이트의 경우, 열처리를 하지 않은 것과 비교해 보았을 때 더 작은 소염 거리를 나타냈다. 특히 STS304의 경우, 열처리 후에 생성된 Cr_2O_3 층이 표면으로 침투하는 라디칼을 막는 부동태 피막(passivity layer) 역할을 하기 때문에 열처리를 거치지 않은 것에 비해 소염 거리가 많이 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 퀴츠와 알루미나의 경우도 소염 거리가 짧게 나타났으나, 그 차이가 미미하다. 그 이유는 메탄-공기 연소반응의 반응 메커니즘이 저온메커니즘에서 고온메커니즘으로 바뀌었기 때문이다. 이에 대한 자세한 설명은 3.5절에 기술하였다.

3.5 표면 온도의 구간별 소염 모드

플레이트의 온도 증가에 따라서 측정한 알루미나의 소염 거리를 Fig. 7에 제시하였다. 온도가 증가함에 따라 소염 거리가 감소하는 구간(A)과, 증가하는 구간(B), 그리고 다시 급격히 감소하는 구간(C)으로 구분되었다. 구간 A에서는 플레이트의 온도가 증가함에 따라서 소염 거리가 감소한다. 히터에 의해 공급되어진 열량에 의해 벽면을 통한 열손실이 감소하였기 때문이다. 그러나 어느 임계온도($T_{\text{crit},1}$)를 지나면서 소염 거리가 점차 증가하는 구간이 나타난다. 열손실의 영향이 소염현상을 결정한다는 관점에서 보면, 플레이트의 온도가 증가함에 따라서 소염 거리는 단순 감소하여야 한다. 그러나 구간 B에서 온도의 증가에도 불구하고 소염 거리가 다시 증가하는 이유는 열적인 영향이 아닌 다른 영향에 의해 소염이 결정됨을 의미한다. 이 구간에서는 라디칼과 벽면사이의 흡착반응으로 인한 화학소염현상의 영향으로 고온임에도 불구하고 소염 거리가 증가하는 현상이 발생한다. 구간 C에서는 소염 거리가 다시 급격히 감소하였다. 이것은 메탄-공기 연소반응의 메커니즘의 변화에 기인한다.

메탄연소반응은 저온화학반응경로와 고온화학반응경로로 구분되어 질 수 있다[19-22]. 반응영역의 온도가 낮을 때는 낮은 chain branching 반응율, H 라디칼의 부재, 그리고 H_2O_2 가 OH 라디칼로 분해 되는 반응이 발생하지 않는다는 특징이 있다. 이 저온반응경로에 의해 지배되는 온도 구간이 Fig. 7에서 구간 A와 B이다. 따라서 생성되어지는 라디칼들이 벽면에서 소멸되기 때문에 구간 B에서 플레이트의 온도가 더 높아짐에도 불구하고 소염 거리가 증가하는 현상이 나타난다.

플레이트의 온도가 더 증가하여 메탄-공기 연

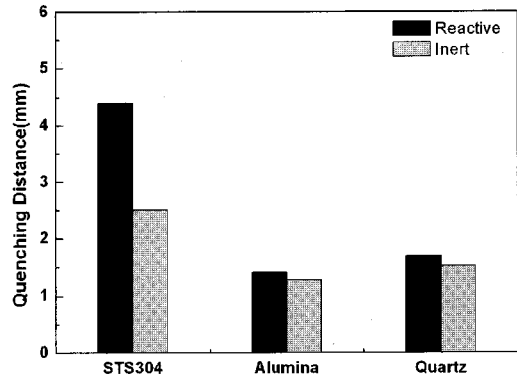


Fig. 6 Quenching distances of both reactive and inert plates at the wall temperature of 1100K.

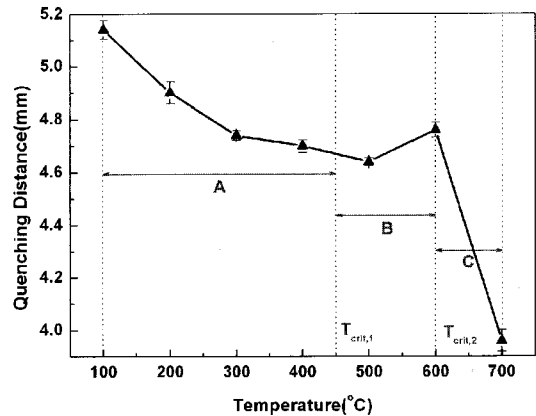


Fig. 7 Quenching distance of reactive alumina with increasing temperature

소반응이 고온화학반응경로로 바뀌게 되면, 열분해 반응에 의하여 라디칼 생성이 촉진된다. 따라서 영역 C에서는 고체의 표면에 존재하는 산소공공에서 소멸되는 라디칼들을 상쇄하고 남을 정도의 충분히 많은 라디칼들이 생성되기 때문에, 화학소염현상이 억제되어 소염 거리가 급격히 감소하게 된다.

알루미나 플레이트의 온도 증가에 따른 소염 거리 변화를 Fig. 8에 제시하였다. 500°C 이하의 온도에서는 반응성과 비반응성 플레이트의 소염 거리가 거의 같음을 확인할 수 있다. 그러나 500~800°C 구간에서는 소염 거리에 차이가 나타났다. 이 구간은 라디칼-표면 상호작용에 의한 화학소염 현상의 중요도가 열손실에 의한 열소염의 영향보다 큰 구간이기 때문이다. 800°C 이상의 고온에서 두 플레이트의 소염 거리가 다시 같아지는 이유는 메탄연소반응의 메커니즘이 고온반응경로로 전환되어 발생하는 라디칼의 수밀도가 급격히 증가하였기 때문이다. Fig. 9에 스테인리

스 스틸에 대한 소염 거리 측정 결과를 제시하였다. 알루미늄과는 달리, 전 온도영역에서 반응성과 비반응성 플레이트의 소염 거리가 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 특히, 반응성 플레이트의 경우 800°C의 고온에서도 구간C가 나타나지 않았다. 이것은 라디칼과의 높은 반응성을 나타내는 금속의 고유한 특징 때문이다. 비반응성 플레이트의 경우 알루미늄의 경우와 같이 600°C 이상의 온도에서 소염 거리가 감소하였다. 그 이유는 Fig. 1의 (b)에서 나타난 산화막이 라디칼이 금속표면으로 확산되는 것을 막았기 때문이다.

3.6 열손실을 고려한 소염 거리 방정식

화염이 두 평판 사이를 전파할 때, 생성되어지는 열량과 벽면을 통하여 손실되어지는 열량이 같을 때 소염이 발생한다는 가정 하에 유도한 소염 거리를 아래 식(1)에 나타내었다[5].

$$d^2 = \frac{4\lambda}{\phi_0 C_p RR} \left(\frac{T_q - T_0}{T_f - T_0} \right) \quad (1)$$

위 식에서 d 는 소염거리, λ 는 열전도도, ϕ_0 는 화학양론적 물분율, C_p 는 정압비열, RR 은 반응율, T_q 는 두 벽면 사이의 중앙온도, T_f 는 단열화염온도, T_0 는 벽면온도를 의미한다. 위의 식(1)에서는 소염을 발생시키는 원인으로 열손실만을 고려하였기 때문에, 표면반응에 의한 영향을 예측할 수 없다. 실제 연소기 내부의 환경은 고온이기 때문에, 화학흡착이 활발하게 발생하여 소염거리의 정확한 예측을 위하여 표면재료의 영향이 반드시 고려되어야 한다. 따라서 라디칼-표면 상호작용에 의한 화학소염현상을 포함하는 새로운 소염 모델이 필요하다. 이 모델은 온도와 압력과 같은 열역학적 상태량과 당량비 및 연료의 화학적 영향뿐 아니라, 표면이 결합농도와 같은 물리량의 영향도 포함해야 할 것이다.

4. 결론 및 향후계획

MEMS 기반의 초소형 장치의 동력원으로의 응용을 위한 마이크로 연소기의 설계에 앞서, 마이크로 연소기에서 안정적인 연소반응을 저해하는 열소염과 화학소염현상의 상대적 역할과 물리적 메커니즘을 고찰하기 위한 실험을 수행하였다. 세 종류(스테인리스 스틸, 알루미늄, 퀴츠)의 플레이트를 이용하여 저온(500K)과 고온(1100K)에서 좁은 벽면사이에 존재하는 메탄-공기 예혼합 화염의 불안정성을 알아보았다. 화학소염을 발생시키는 고체 표면에 존재하는 산소공공과 결정립계의 반응성을 낮추기 위하여, 세 종류의

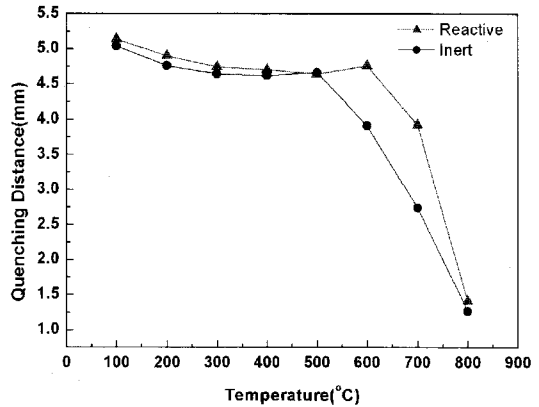


Fig. 8 Quenching distances of both inert and reactive alumina with increasing temperature.

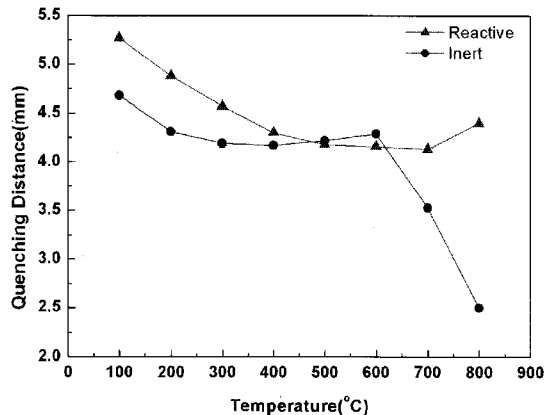


Fig. 9 Quenching distances of both inert and reactive STS304 with increasing temperature.

플레이트를 1000°C에서 산소분위기로 12시간 동안 열처리하였다. 각 플레이트를 반응성과 비반응성 플레이트로 나누어 특정온도에서 나타나는 소염특성을 고찰하였다. 실험결과, 저온영역에서는 화학 소염보다 열손실에 의한 열소염의 영향이 상대적으로 크기 때문에, 고체표면의 특성이 소염 거리에 큰 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다. 반면 고온영역에서는 표면에서 라디칼 파괴의 영향으로 소염 거리가 벽면 재료의 함수임을 확인할 수 있었다. 따라서 소염 거리 이하에서 화염을 안정적으로 유지시키려면 충분한 단열을 통하여 열손실을 막아주는 것뿐만 아니라, 연소기 표면과 라디칼과의 반응성을 줄이기 위한 특별한 표면 처리가 필요함을 확인하였다.

표면에서 일어나는 라디칼의 흡착 및 재결합 반응을 보다 더 정밀하게 관찰하기 위하여 레이저 유도형광법(Laser Induced Fluorescence, LIF)

을 이용하여 표면 위에 존재하는 OH라디칼의 농도 분포를 측정할 것이다.

후 기

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

참고문헌

- [1] Fernandez-Pello A. C., "Micro-Power Generation Using Combustion: Issues and Approaches," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 883.
- [2] Davy H., "Some Researches on Flame," *Trans. R. Soc. Lond.*, 1817, Vol. 45.
- [3] Jarosinski J., "Flame Quenching by a Cold Wall," *Combustion and Flame*, Vol. 50, 1983, pp. 167-175.
- [4] Jarosinski J., "A Survey of Recent Studies on Flame Extinction," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 12, 1986, pp. 213-225.
- [5] Kuo, K. K., "Principles of Combustion," *John Wiley & Sons*, 1986.
- [6] Westbrook, C. K., Adameczyk, A. A., and Lavoie, G. A., "A Numerical Study of Laminar Flame Wall Quenching," *Combustion and Flame*, Vol. 40, 1981, pp. 81-99.
- [7] Vlachos, D. G., Schmidt, L. D., and Aris, R., "Ignition and Extinction of Flames Near Surfaces: Combustion of H_2 in Air," *Combustion and Flame*, Vol. 95, 1993, pp. 313-335.
- [8] Ziauddin, M., Balakrishna, A., Vlachos, D. G., and Schmidt, L. D., "Ignition of Methane Flames in Oxygen Near Inert Surfaces: Effects of Combustion, Pressure, Preheat, and Residence Time," *Combustion and Flame*, Vol. 110, 1997, pp. 377-391.
- [9] Daou, J., and Matalon, M., "Influence of Conductive Heat-Losses on the Propagation of Premixed Flames in Channels," *Combustion and Flame*, Vol. 129, 2002, pp. 321-339.
- [10] Warnatz, J., Maas, U., and Dibble, R. W., "Combustion," *Springer*, 3rd ed., 2001.
- [11] flame stability and wall heat flux: hydrogen-air mixtures," *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 2, 1998, pp. 515-530.
- [12] Sloane, T. M., Schoene, A. Y., "Computational Studies of End-Wall Flame Quenching at Low Pressure: The Effects of Heterogeneous Radical Recombination and Cavities," *Combustion and Flame*, Vol. 49, 1983, pp. 109-122.
- [13] Sloane, T. M., and Ratcliffe, J. W., "A Molecular Beam Mass Spectrometer Study of Side-Wall Flame Quenching at Low Pressure by Cooled Noncatalytic and Catalytic Surfaces," *Combustion and Flame*, Vol. 47, 1982, pp. 83-92.
- [14] Callister, W. D., "Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach," 2nd ed., *John Wiley & Sons, Inc.*, 2005.
- [15] Jaeger, R. C., "Introduction to Microelectronic Fabrication," *Prentice Hall*, 2nd ed., 2002.
- [16] Masel, R. I., "Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surfaces," *Wiley series in chemical engineering*, New York, 1996.
- [17] Ruthven, D. M., "Principles of Adsorption and Adsorption processes," *John Wiley & Sons*, 1984.
- [18] Azzoni, R. Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K., "The Structure of Triple Flames Stabilized on a Slot Burner," *Combustion and Flame*, Vol. 119, 1999, pp. 23-40.
- [19] Dagaut, P., Boettner, J. C., and Cathonnet, M., "Methane Oxidation: Experimental and Kinetic Modeling Study," *Combustion Science and Technology*, Vol. 77, 1991, pp. 127-148.
- [20] Westbrook, C. K., and Dryer, F. L., "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 10, 1984, pp. 1-57.
- [21] Glassman, I., "Combustion," *Academic Press*, 3rd ed., 1996.
- [22] Benson, S. W., "The Kinetics and Thermochemistry of Chemical Oxidation with Application to Combustion and Flames," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 7, 1981, pp. 125-134.