

< 논문 >

초소형 연소기에서 연소성능과 연소속도에 대한 연구

나한비* · 이대훈** · 권세진†

(2004년 7월 12일 접수, 2005년 4월 4일 심사완료)

Study on Combustion Performance and Burning Velocity in a Micro Combustor

Hanbee Na, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon

Key Words : Micro Combustor (초소형 연소기), Heat Loss (열손실), Quenching(소염), Burning Velocity (연소속도), Visualization (가시화)

Abstract

The effect of heat loss on combustion performance and burning velocity of micro combustors in various conditions were exploited experimentally. Three different gases were used, and various geometric matrixes were considered to figure out the phenomena of combustion in a micro combustor. The micro combustors used in this study were constant volume combustors and had cylindrical shape. Geometric parameter of combustor was defined as combustor height and diameter. The effect of height was exploited parametrically as 1mm, 2mm and 3 mm and the effect of diameter was parameterized to be 7.5 mm and 15 mm. Three different combustibles which were Stoichiometric mixtures of methane and air, hydrogen and air, and mixture of hydrogen and air with fuel stoichiometry of two were used. By pressure measurement and visualization of flame propagation, characteristic of flame propagation was obtained. Flame propagations which were synchronized with pressure change within combustor were analyzed. From the analysis of images obtained during the flame propagations, burning velocity at each location of flame was obtained. About 7 % decrease in burning velocity of CH₄/Air stoichiometric mixture compared with previous a empirical result was observed, and we can conclude that it is acceptable to use empirical equations for laminar premixed flame burning velocity to micro combustions. Results presented in this paper will give fine tool for analysis and prediction of combustion process within micro combustors.

기호설명

A : 화염면 면적
D : 연소기 직경
H : 연소기 높이
L : 화염면 길이
P : 압력
S : 연소속도
T : 온도
k : 비열비

m : 질량
 \dot{m} : 질량 변화율
t : 시간
 ρ : 밀도
 ϕ : 당량비

하첨자

S : 표준상태
L : 층류값
u : 미연영역값
init : 초기상태

* 항공우주연구원 추진제어그룹
** 회원, 한국기계연구원 환경·에너지기계연구본부
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
E-mail : melody@kaist.ac.kr
Tel : 042-869-3721, Fax : 042-869-3710

1. 서론

마이크로 스케일의 열-화학 장치들의 다양한

개념들이 제시되면서 동적, 정적 구조물을 통해 전기화학적 혹은 열동력 에너지를 얻기 위한 연구들이 진행되고 있다. 대표적인 예가 마이크로 엔진이나 마이크로 연료전지 등을 통해 초소형 동력 장치를 개발하려는 시도이다.⁽¹⁾ 이러한 장치는 고온상태의 연소반응으로부터 열에너지를 얻어내거나 고온상태의 전기화학 반응으로부터 전기에너지를 얻어내는 것이 목적이다. 초소형 시스템에 적용 가능한 다양한 기술 중 초소형 연소기 기술은 높은 에너지 밀도와 매크로 스케일에서의 많은 연구 경험을 통해 가장 가능성이 높은 대안으로 받아들여지고 있다.⁽²⁾ 초소형 연소기는 소염이 발생하는 환경과 근접한 상태에서 작동하는 연소기로 현재까지 연구된 연소기들의 높이는 약 0.5mm ~ 5mm이다.⁽³⁻⁵⁾ 대부분의 마이크로 시스템 기술이 형상 축소에 따른 여러가지 기술적 난제에 직면하게 되듯이 마이크로 연소기에서는 형상 축소에 따른 과도한 열손실 등의 영향을 받게 된다. 따라서 마이크로 스케일에서 일어나는 연소 반응 시 발생하는 높은 열구배와 열손실이 야기하는 영향에 대한 연구는 마이크로 열동력 장치의 가능성에 대한 기초 연구의 성격을 가지게 된다. 이를 위해 작은 공간에서 화염의 점화, 전파, 열손실과 공간효과가 연소특성에 미치는 영향을 파악하는 연구가 요구된다.

그간 국내외를 망라해 마이크로 연소기에 대한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 초기의 마이크로 연소기에 대한 연구는 마이크로 엔진제작의 전 단계로 스케일 자체에 대한 가능성 및 연소특성을 파악하는 단계로부터 시작해서^(6,7) 다양한 형상의 마이크로 연소기 자체에 대한 연구로 발전하고⁽³⁻⁵⁾ 이를 통해 소염거리 및 소염의 범위나 외부환경이 소염에 미치는 영향 등에 대한 평가가 수행되어 왔다.⁽⁸⁾ 대부분의 연구는 실험적으로 접근하여 마이크로 연소기를 제작하고 화염 전파현상을 관찰하는 형태로 수행되었지만, 일부는 화염전파를 모사하기 위한 수치적 연구를 수행하였다.⁽⁹⁾

매우 작은 공간에서 화염이 점화, 전파, 소파되는 마이크로 연소기의 경우 전체적인 반응의 시간이 매우 짧다. 본 연구에 사용된 연소기의 경우 대략 10ms 내외의 시간에 화염의 전파가 마무리되게 된다. 따라서 열전대를 이용한 온도변화의 측정이 매우 어렵고 벽면이나 연소기내의 온도 변화를 계측하는 것이 어렵다. 이러한 계측상의 어려움으로 인해 직접 온도를 계측해서 열손실의 영향을 평가하지 않고 압력측정 결과로부터 간접적으로 열손실을 이론적으로 평가하는 연구가 수행되기도 했다.⁽¹⁰⁾ 그러나 압력측정에 바탕을 둔 기

존의 연구들도 과도한 열손실 환경에서의 화염전파에 대한 가시화나 그에 따른 연소속도의 특성 등에 대한 연구는 부족한 실정이다. 연소속도는 연료의 당량비, 첨가 기체, 미연가스의 압력과 온도 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있는데 소염 조건에 근접한 초소형 연소기의 경우 연소기 내에서의 화염전파 및 연소속도가 어떤 변화를 가지게 되는지에 대한 연구는 미미한 상태이다. 본 연구에서는 기존의 형상 축소된 연소기로부터^(3,5) 연소기의 형상을 일부 개조하여 화염의 전파특성과 연소압력을 실험적으로 측정할 수 있도록 하였다. 이를 통해 초소형 연소기와 같은 극한 상황에서의 연소현상을 파악하고 기초적인 자료를 축적하는 것을 그 목적으로 하였다. 본 연구의 결과들을 통해 마이크로 연소기 내에서의 화염의 전파특성에 대한 이해가 얻어 질 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험

2.1 실험장치

초소형 연소기 내에서의 연소특성을 알아보기 위해 연소기를 제작하였다. 일차적으로 화염의 전파과정을 가시화하는 것이 연소속도에 대한 중요한 정보가 되므로 가시화가 중요하다. 따라서 기존의 실린더 형상의 높이가 조절 가능한 마이크로 연소기^(3,5)에서 가시화를 가능할 수 있도록 개조한 것이다.⁽¹¹⁾

마이크로 연소기 환경을 모사하기 위해 연소기의 스케일을 mm 스케일에서 조정하여 연소기 형상 변수를 결정하였다. 연소기 형상스케일에 대한 변수는 Table 1에 나와 있는 바와 같다. 미세한 공간 내에서 일어나는 화염전파는 화염의 전파 시간이 매우 짧고 화염이 전파하는 영역이 매우 작을 뿐 더러 연소기 높이가 작고 연소기 내 연료의 양이 작으므로 화염에 의한 발광량이 작아 직접 촬영을 통한 가시화에 어려움이 있다. 특히 수소 화염과 같이 시각적으로 확인이 어렵고 빨리 전파되는 연료의 경우 다른 형태의 가시화 기법을 도입해야 한다.

본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 연소기의 양 면을 퀴츠 유리로 만들어 빛의 투과가 가능하도록 하여 직접 가시화가 아닌 슈리렌(Schlieren) 기법을 이용해 화염의 전파를 가시화 하였다. 이를 위해 제작된 연소기의 개략도는 Fig. 1과 같다. 가시화 실험을 위한 실험 장치의 구성은 Fig. 2와 같으며 매우 작은 공간에서 빠르게 전파되어 가는

Table 1 Combustor geometry matrix

Combustor geometry		Height (mm)		
		1	2	3
Diameter (mm)	15	0	0	0
	7.5	N/A	0	N/A

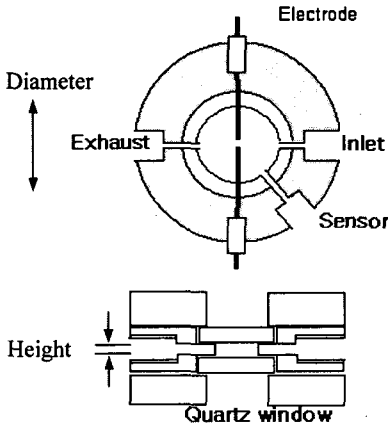


Fig. 1 Schematic of combustor

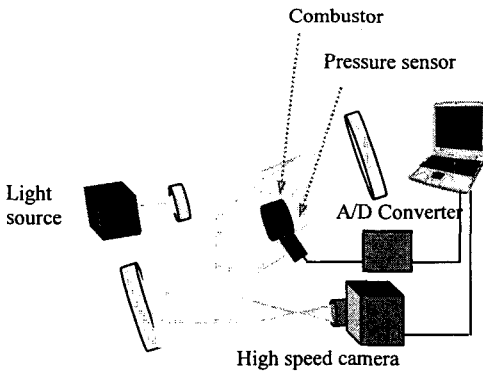


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

화염의 이미지를 얻기 위해 초당 2000 프레임의 고속 카메라 촬영을 통해 화염전파의 슬리렌 이미지를 얻었다. 가시화뿐만 아니라 연소과정 중에 연소관의 압력을 측정하였다. 사용된 압력센서는 Kulite 사의 ETM-375-450A 모델로써 압력측정 간격은 0.2 ms 이었다.

실험에 사용된 예혼합 기체는 당량비 1 과 2 조건인 수소 / 공기 혼합 기체와 당량비 1 인 메탄 / 공기 혼합 기체이다. 연소기 내의 혼합기체의 점화는 Power TR 로 구성된 전자회로의 스위칭 시

언어진 유도코일에서의 고전압으로부터 얻어진 전극의 방전으로부터 얻었다. 전극사이의 간격은 모든 시험조건에서 1 mm 으로 고정하였다. 실험은 점화와 화염의 전파 후 기연가스를 미연가스로 대체하는 순서로 수행되었으며 이 과정에서 기연가스가 배출되도록 하였다.

2.2 실험 조건

실험은 연소특성에 영향을 주는 것으로 판단되는 변수들을 중심으로 수행하기 위해 각 연소기의 형상조건에 대해 서로 다른 연료 및 초기압력으로 공급하여 실험을 수행하였다. 실험조건은 연소기 형상, 연소기내 초기 압력, 연료 조건의 3 가지였으며 연소기 형상 정보는 Table 1 에 나와 있는 바와 같다. 연소기 높이의 영향을 알기 위해 연소기 지름이 15 mm 에 대해서 높이가 1, 2, 3 mm 가 되도록 3 개의 제작된 연소기를 사용하였고 연소기 직경의 영향을 알기 위해 연소기의 높이 2 mm 에 대해서 지름이 7.5 mm 인 연소기를 제작하였다. 혼합가스의 초기온도는 약 275 K 이었다. 연소기내 초기 압력은 각각 1, 1.5, 2, 3 bar 조건으로 수행하였다. 당량비 2 인 수소 공기 혼합 기체의 경우 연소기 높이 1 mm 조건에서 소염의 발생 없이 화염 전파를 관찰할 수 있는 연소기 초기압력의 최소 조건의 범위가 당량비 1 인 경우보다 높기 때문에 연소기 내 초기압력을 4 bar 까지 올리며 추가적인 실험을 수행하였다. 가시화를 통한 해석에 선행하여 소염이 발생하는 영역을 알아보기 위해 앞서 제시된 연소기 내 초기 압력에 대한 실험조건이 소염조건에 근접하게 되면 소염조건 인근에서 연소기 내 초기압력을 0.1 bar 씩 변화시켜 연소기 형상과 연료의 조건에 대한 소염조건을 찾아 내었다

3. 결 과

3.1 연소기내의 압력 변화

실험조건에 제시된 각 경우에 대해 점화 및 점화로 인한 압력변화를 측정하였다. 낮은 연소속도를 가지는 반응물에 대해서 정적연소기 내에서 위치에 따른 압력의 변화는 크지 않다.⁽¹²⁾ 따라서 포트를 통해 얻어진 압력을 이용해서 각 조건에서의 화염의 전파 속도를 비교해 볼 수 있다.

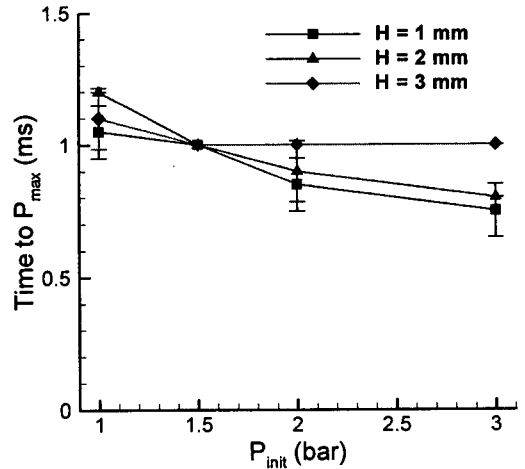
화염이 전파되는 경우 압력측정을 통해 압력상승을 확인할 수 있기 때문에 압력측정의 결과로부터 소염이 발생하는 조건을 확인할 수 있다. Table 1 에 제시되어있는 각 연소기 형상에 대해서 화염 전파가 가능한 최소 초기압력을 구한 결과가 Table 2 에 제시 되어 있다.⁽¹³⁾ 소염조건 부근에서

0.1 bar 씩 연소기내 초기압력을 변화시키면서 구하였다. 문헌에 의하면 표준상태에서 당량비 1 의 수소와 공기 예혼합 가스의 소염거리는 0.64 mm 이고, 당량비 1 의 메탄과 공기의 예혼합 가스의 소염거리는 약 2.5 mm 이다.⁽¹⁴⁾ 따라서 Table 2 에서와 같이 당량비 1 인 수소와 공기의 예혼합 가스를 사용할 경우 모든 연소기들의 높이가 1 mm 이상이므로 소염거리보다 크기 때문에 모든 실험 조건에 대해서 점화를 시켜서 화염을 전파시킬 수 있었다. 하지만 당량비 1 인 메탄과 공기의 예혼합 가스에 대해서는 연소기의 높이가 1 mm, 2 mm 인 것은 초기압력이 1 bar 일 때 소염거리 이내이므로 화염을 전파시키지 못한다. 소염거리는 초기압력에 반비례하므로 화염을 전파시키기 위해서는 초기압력을 높여야 한다. 연소기 높이가 2 mm 인 경우에 화염전파를 위한 최소 압력이 1.3 bar ~ 1.2 bar 사이에 존재하였다. 따라서 초기압력과 소염거리의 이론식을 만족하였다. 마찬가지로 연소기 높이가 1 mm 인 경우에는 점화를 하기 위해서는 더욱 높은 초기압력이 필요하고, 실험을 통해 알아본 결과 점화를 위한 최소압력이 약 3.1 bar 이었다. 당량비 2 인 수소와 공기의 혼합가스의 경우도 점화를 위한 최소 초기압력을 구하였다.

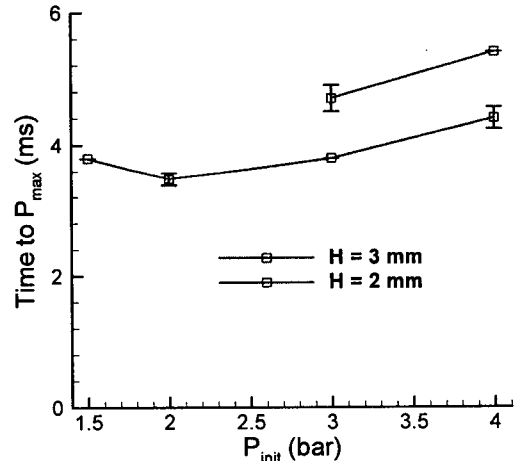
다양한 실험조건에서 최고압력에 도달하기까지의 시간이 Fig. 3 에 나와있다. 당량비 1 의 수소/공기 혼합가스의 결과인 Fig. 3(a)에서 최고압력에 도달하는 시간은 압력이 높아 질수록 짧아지고 이러한 초기압력의 효과가 연소기 높이의 증가와 함께 감소된다. 전반적으로 연소기 높이가 높을 때

Table 2 Minimum initial pressure to guarantee flame propagation in tested micro combustor

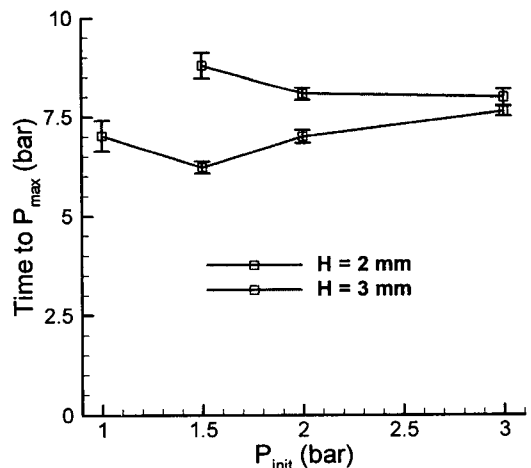
Chamber diameter (mm)	Chamber height (mm)		
	1	2	3
H ₂ / Air, $\phi=1$			
7.5	N/A	less than 1	N/A
15	less than 1	less than 1	less than 1
H ₂ / Air, $\phi=2$			
7.5	N/A	2.5	N/A
15	more than 6	3	1.3
CH ₄ / Air, $\phi=1$			
7.5	N/A	1.3	N/A
15	3.1	1.3	less than 1



(a) H₂/Air, $\phi=1.0$, D=15 mm



(b) H₂/Air, $\phi=2.0$, D=15 mm



(c) CH₄/Air, $\phi=1.0$, D=15 mm

Fig. 3 Time to reach maximum pressure in each experiment condition

시간이 더 많이 걸리는 이유는 연소기 내부에 있는 연료의 증가로 인한 것으로 판단된다.

한편 당량비 2 인 수소와 공기의 혼합기체의 경우 Fig. 3(b) 에 나와 있듯이 당량비 1 인 경우와는 다른 거동을 보인다. 연소기 내 초기압력이 높아 질수록 최고압력에 도달하는 시간이 증가한다. 이것은 당량비의 차이가 가져오는 발열량 등의 차이로 인해 기연영역에서의 열손실의 효과가 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 상대적인 열생성과 손실비의 효과가 연소 길이 길어질수록 크게 평가 되어지는 것으로 보인다.

Fig. 3(c)는 메탄과 공기의 예혼합 가스의 최대압력 도달 시간을 나타낸 것이다. 상대적으로 최대압력 도달 시간의 변화는 적었다. 하지만 연소기 높이가 2 mm 와 3mm 인 경우를 비교할 때 3 mm 에서 열손실이 상대적으로 작기 때문에 높은 온도를 유지하여 연소속도가 증가하여 더 빨리 최대압력에 도달함을 알 수 있다.

흥미로운 점은 당량비 2 인 수소/공기 혼합 가스와 당량비 1 인 메탄/공기 혼합 가스의 경우 최고압력 도달 시간 즉 연소시간의 증가와 감소가 어떤 특정한 조건을 기준으로 감소에서 증가로 전환되어지는 경향을 확인할 수 있는데 이는 연소기 크기 조건으로 인한 열손실의 효과가 연소기 성능 특성에 미치는 영향의 정도가 특정 스케일의 기준을 중심으로 상대적으로 변화한다는 것을 의미한다.

Fig. 4 는 당량비 1 인 메탄과 공기의 예혼합 기체에 대해서 여러가지 연소관 형상에 대해서 초기압력의 변화에 따른 최대압력대 초기압력의 비를 비교한 것이다.⁽¹⁵⁾ 이 그림에서는 CEA(Chemical Equilibrium with Application)⁽¹⁶⁾로 계산한 이론치와 비교를 했다. 정적연소기는 연소압력의 증가에 의해서 피스톤 등을 작동시켜서 기계적 에너지를 얻어내는 것이 목적이므로 연소에 의한 높은 압력상승이 유리하다. 초소형 연소기에서 열손실을 정량화 하는 단순한 방법으로 이상적인 상태에서의 압력상승 값과 실제 압력상승 값의 차이를 생각할 수 있다. Fig. 4 에서와 같이 일정한 연소기 높이에 대해서는 초기압력이 변한다고 하더라도 압력 증가 비(최대압력/초기압력)의 변화는 거의 없었다.

당량비 1 인 메탄과 공기의 예혼합 가스에 대해서 초기압력이 3.0 bar 일 때의 압력비(실제상승량/이론상승량)를 Table 3 에 정리하였다. 연소기 높이가 1 mm 인 경우는 초기압력이 3.0 bar 일때는 소염거리 이내이므로 초기압력이 3.1 bar 일때의 결과를 사용하였다. Fig 3 에서와 같이 소염조건에 근접

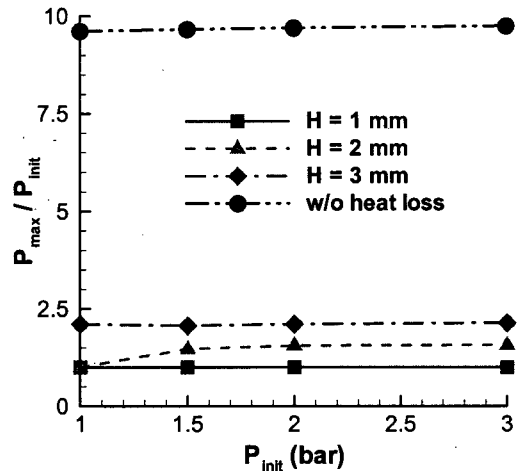


Fig. 4 Maximum to initial pressure ratio in each test condition

Table 3 Pressure ratio for each height condition ($CH_4/Air, \phi=1$)

Height	1 mm	2 mm	3 mm
Pressure Ratio	2 %	7 %	13 %

할수록 열손실이 증가함으로써 연소기의 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

추후 초소형 연소기를 사용하고자 할 때에는 설계단계부터 이러한 저효율을 염두에 두고 적절한 크기의 연소기를 제작해야 할 것이다.

3.2 화염 전파의 가시화

각 실험조건에 대한 슬리렌 방법을 이용하여 몇 가지 실험 조건에서 화염전파에 대한 가시화를 수행하였다. 가시화를 통해 소염거리 이내의 조건에서의 환경에서 점화가 되지 않는 현상과 점화가 될 때에 화염이 전파하는 과정을 관찰할 수 있었다.

압력측정의 결과를 통해서 Table 2 에 나와 있는 바와 같이 당량비 1 인 CH_4/Air 혼합가스의 경우 연소기 높이 1 mm 일 때 소염이 발생하지 않을 연소기 초기압력은 3.1 bar 이상이였다. Fig. 5 는 당량비 1 인 메탄과 공기 예혼합 가스에 대해서 연소기 높이가 1 mm 이고, 초기압력이 3.0 bar 일때의 연소관내의 모습이다. 소염거리 이내의 환경이므로 점화가 되지 않고 점화기에 의한 스파크만 발생하였다가 없어지는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 6 은 Fig. 5 와 비교하여 초기 압력만을 3.1 bar 로 상승 시킨 것이다. 이 조건에서는 연소기의 높이가

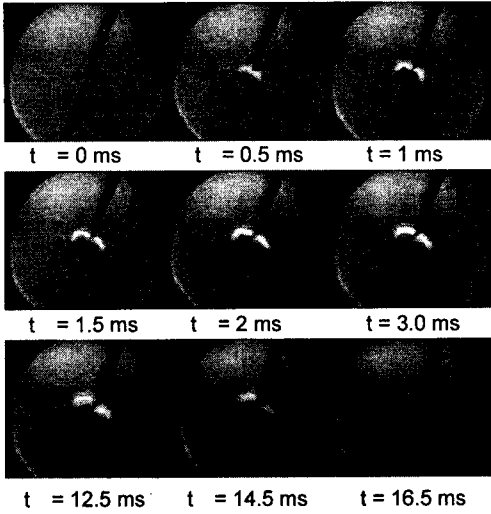


Fig. 5 Flame propagation images in case of the occurrence of quenching (CH₄/Air, $\phi=1.0$, D=15 mm, H=1 mm, P_{init}=3 bar)

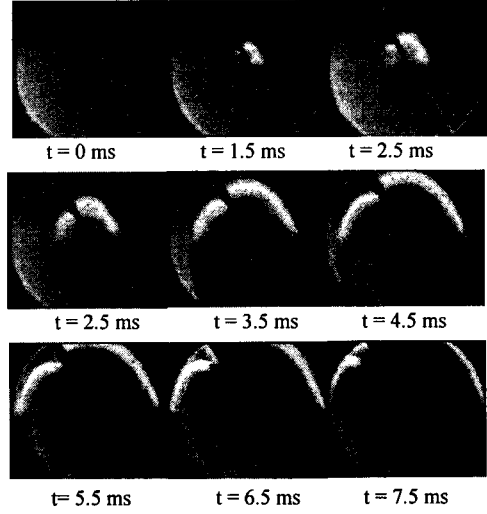


Fig. 7 Flame propagation images (CH₄/Air, $\phi=1.0$, D=15 mm, H=3 mm, P_{init}=3.0 bar)

다. 이 경우에는 사체적의 영향이 상대적으로 작기 때문에 비교적 동심원으로 퍼져나가는 것을 관찰하였다. 얻어진 화염 전파의 가시화 결과로부터 각 시간 별의 화염 면의 위치를 측정하여 그 결과를 바탕으로 연소속도를 구하기 위한 분석을 수행하였다.

3.3 연소 속도

소염이 발생하지 않고 화염 전파가 발생한 조건의 가시화 결과로부터 연소속도를 구하였다. 일반적으로 예혼합 기체에서의 층류화염 전파시 연소속도는 온도와 압력, 당량비 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있고, 여러 연구자들에 의해 연소속도를 예측하기 위한 모델들이 제시되었다. 이와 같은 모델의 대표적 예로 CH₄/Air 예혼합 가스에 대한 아래 식 (1)과 같은 Bradley 와 Mitchaelson 의 연소 속도 모델을 들 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$S_L = (10 + 0.000371T_u^2) - 0.0052T_u^{1.5} \log_{10} P_u \quad (1)$$

$$298 < T_u < 473 (K)$$

$$1 < P_u < 23 (atm)$$

또한 Iijima 와 Takeno 는 H₂/Air 와 CH₄/Air 혼합 가스에서 압력과 온도와 다양한 당량비 상태에서 연소속도 모델을 제시하였다.⁽¹⁸⁾ 메탄과 공기의 예혼합 가스에 대해서 연소속도 경험식은 식 (2)와 같다.

$$S_L = S_{LS} \left\{ 1 + \beta \log \left(\frac{P}{P_S} \right) \right\} \left(\frac{T_u}{T_{uS}} \right)^\alpha \quad (2)$$

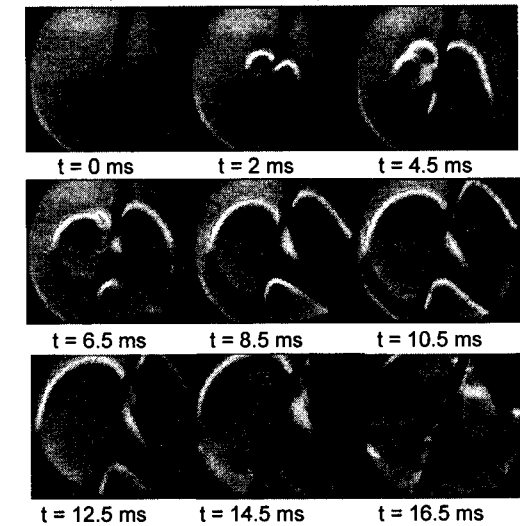


Fig. 6 Flame propagation images (CH₄/Air, $\phi=1.0$, D=15 mm, H=3 mm, P_{init}=3.1 bar)

소염거리 이상이므로 점화가 되고 화염의 전파현상을 관찰할 수 있었다. 그런데 화염이 동심원으로 퍼져 나가지 않고 한쪽으로 이그러져 있는데, 이것은 연소기내의 port 에 의한 사체적(dead volume) 때문에 생긴 것이다. 사체적의 존재가 화염 전파에 민감한 영향을 미쳐 포트 방향으로 화염전파가 가속되어서 화염의 형태가 동심원상에서 벗어나 이그러져 되는 모습을 보여 주고 있다. Fig. 6 에 연소기 높이 3 mm 이고 연소기 초기압력 3 bar 조건 에서의 가시화 결과가 제시되어 있

$$S_{LS} = 36.9 - 210(\phi - 1.12)^2 - 335(\phi - 1.12)^3 \text{ (cm/s)}$$

$$\alpha = 1.60 + 0.22(\phi - 1)$$

$$\beta = -0.42 - 0.31(\phi - 1)$$

본 연구에서는 화염의 가시화를 통해 열손실이 큰 환경에서의 화염전파 특성을 분석하고 연소속도에 영향을 주는 요소들을 파악하였다.

통상 화염면에서 발생하는 연소속도는 식 (3)과 같이 화염면을 지나가는 질량과 미연 영역의 밀도로 표현할 수 있다.⁽¹⁹⁾

$$S_L = \frac{\dot{m}}{\rho_u A} \tag{3}$$

본 실험에 사용된 실린더 형 연소기의 경우 화염면 면적은 이미지 분석을 통하여 구한 화염면 길이(L)를 연소기 높이로 곱하여 구하였다. 그리고 각각의 단위시간 Δt 에서의 연소되는 반응물 질량 Δm_u 을 구하면 식 (3)은 다음과 같이 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$S_L = \frac{\Delta m_u}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A \rho_u} \tag{4}$$

연소속도를 구하는 과정 중 미연가스의 온도는 측정된 연소압력을 이용하여 예측하였다. 정적 연소기내에서 연소가 발생하면 압력상승에 의해서 미연가스가 압축이 되어 온도가 상승하게 된다. 그런데 초소형 연소기 내에서는 압력 상승이 작기 때문에 온도 상승 값도 작아질 것이므로 미연가스에서의 열손실을 무시할 수 있다. 따라서 등엔트로피 관계식 식 (5)를 이용하여 미연가스의 온도와 밀도를 예측하였다.

$$P \left(\frac{1}{\rho} \right)^k = \text{constant} \tag{5}$$

연소속도를 구하는 전체적인 과정은 다음과 같다. 먼저 미연가스에서의 온도와 밀도를 구한다. 그리고 가시화 데이터를 이용하여 이 때의 화염의 위치, 관심체적 내의 화염면의 길이, 기연가스 영역의 면적, 미연가스영역의 면적을 구한다. 이 과정 중에서 정의한 관심 체적, 화염면, 화염면의 위치에 대한 정보는 Fig. 8 에 나와 있는 바와 같다. 화염면의 길이로부터 화염면적이 구해지면 미연가스의 밀도와 이전 시간단계에서의 미연가스 질량

값으로부터 미연영역의 질량변화 값을 구할 수 있게 된다(Δm_u). 이러한 데이터를 식 (4)에 대입을 하여 연소속도를 구하였다. 연소속도가 구해지면 다시 시간 Δt 만큼이 지난 후의 압력 값에서 다시 위 과정을 반복하고 화염면이 벽면에 닿거나 반응이 종료될 때까지 반복하게 된다. 이러한 전체적 과정은 Fig. 9 와 같다.

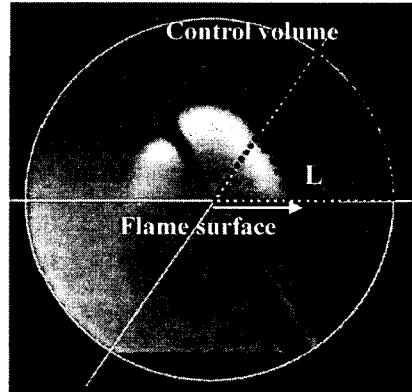


Fig. 8 Definition of control volume, flame surface and flame location

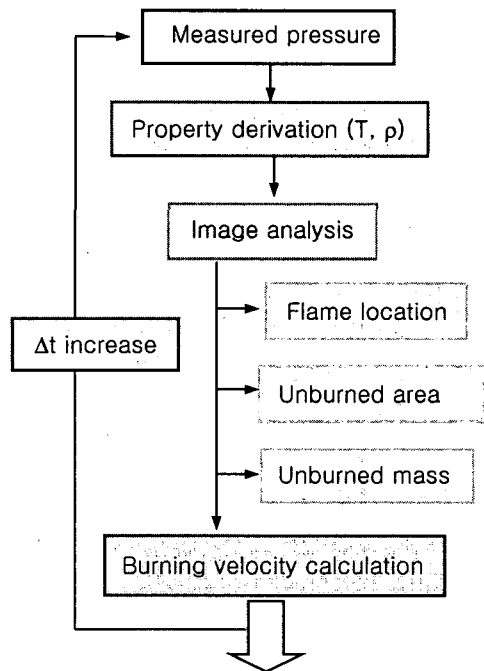


Fig. 9 Schematic process for determination of burning velocity with measured pressure and visualized images

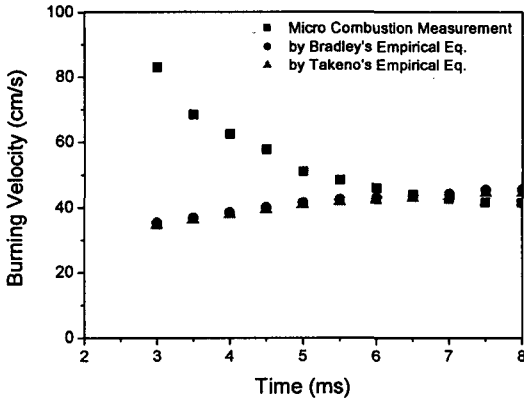


Fig. 10 Comparison of burning velocity of micro combustor with burning velocity obtained using empirical equations (CH_4/Air , $\phi=1.0$, $D=15$ mm, $H=3$ mm, $Pi=3$ bar)

당량비 1 인 CH_4/Air 에혼합 기체의 실험에서 연소기 높이가 3 mm 일 때의 가시화 결과로부터 구한 연소속도와 이때의 계측된 압력값을 이용하여 연소속도 경험식 [식 (1), 식 (2)]에 대입하여 구한 결과와의 비교가 Fig. 10 에 제시되어 있다. 비교 기준으로 삼은 Takeno 와 Bradley 의 경험 식 으로부터 얻은 결과는 미연가스의 초기온도 275 K 에 대해서 각 시간에 해당하는 측정된 압력 값을 이용하여 등엔트로피 관계식[식 (5)]을 이용하여 구한 온도를 연소속도 실험식[식 (1), 식 (2)]에 대입하여 구하였다.

연소기 높이 3mm 의 경우 마이크로 연소기의 경우 초기에서는 연소속도 값이 이론치와 큰 차이를 나타내고 있지만, 화염이 전파해 나감으로써 특정한 연소속도 값에 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다. 초기의 연소 속도가 매우 높게 나타나는 이유는 실제 연소속도가 큰 것을 의미하지 않고 초기 점화 시 발생한 스파크의 영향 때문이다. 점화 과정에서 형성된 화염 커널의 크기가 대략 2 mm 정도 범위에서 형성되기 때문에 초창기의 연소면의 확장은 반응물의 연소에 의한 열전달에 의한 화염면의 팽창보다 초기 커널에 영향에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 실제로 화염이 전파되지 않는 실험조건의 가시화인 Fig. 5 에서와 같이 점화 스파크에 의한 화염 커널은 약 3 ms 까지 뚜렷하게 남아 있었다. 따라서 이런 시간 영역에서는 스파크에 의해서 연소속도가 이론치에 비해서 매우 높게 평가된 것으로 판단된다. 하지만 화염이 전파 되면서 시간이 지남에 따른 스파크의 소멸과 점화 초기 커널 위치로부터 화염면이 멀어지면서 점화원의 효과는 감쇄해 가는 것으로 보인다.

다. 약 6 ms 이후부터는 점화원의 영향이 거의 사라진 것으로 판단된다. 수렴되는 연소속도는 Takeno 의 경험식을 이용하여 구한 연소속도에 비해서 약 7 % (Bradley 경험식 기준에서의 오차는 약 9 %) 정도의 작은 값을 가지는 것으로 분석되었다. Takeno 의 실험식은 최대 10%의 편차를 가정하고 있으므로,⁽¹⁷⁾ 점화원의 영향이 없을 때의 초소형 연소기내에서의 연소속도는 Takeno 의 실험식으로 예측된 값의 범위 내에 있다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 결과를 종합을 하면 초소형 연소기내에서의 연소속도는 점화원의 영향을 배제한다면 일반적인 연소기 에서의 연소속도(미연가스의 온도와 압력이 같은 조건에서)와 같다고 생각할 수 있다. 그렇지만 Fig. 10 에서와 같이 초기 점화원의 영향이 화염전파에 미치는 영향이 매우 크므로 초소형 연소기내의 연소현상 분석 시에 점화원의 크기와 작동시간에 대한 충분한 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.

화염면의 위치와 기연영역의 면적은 길이, 면적을 측정할 수 있는 이미지 분석 프로그램을 사용하여 수행하였으며 화염면의 지정과 관련하여 오차의 가능성이 발생할 수 있으나 픽셀 단위의 차이는 얻어진 질량 변화 값에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

1mm 높이의 연소기에서는 사체적에 의해서 화염전파의 형상이 매우 이그러져 있어 의미 있는 결과를 얻어내기 어려웠다. 이와 유사하거나 작은 크기의 연소기 스케일 내에서 발생하는 연소속도의 측정을 위해서는 일차원 화염전파 실험을 통해 접근하는 것이 더 유용할 것으로 판단된다.

4. 결론

소염 조건에 근접하는 연소기 형상 및 스케일에서 소염이 발생하는 영역을 확인하였다. 압력상승 관점에서 초소형 연소기의 효율을 정량적으로 표현했으며 연소기 높이에 따른 압력변화를 구하였다. 초소형 연소기 효율은 일반적인 연소기에 비해서 낮기 때문에 연소기 설계 시에 크기와 효율에 대한 적절한 타협점을 찾아야 한다.

화염 전파 과정에서 얻어진 압력 변화와 가시화의 결과를 이용해서 연소기 내에서의 화염의 연소속도를 구하였다. 연소기 높이 3 mm 에 대해서 연소속도 분석을 수행한 결과 초기 점화원에 의한 영향을 배제한다면 실제 층류 에혼합 가스의 연소속도 경험식의 결과와 근접하였다. 따라서 기존의 연소속도 식을 이용하여 초소형 연소기내의 화염전파에 적용할 수 있을 것이다. 하지만 초소형 연

소기 특성상 점화원의 영향이 연소현상에 미치는 것이 매우 크므로, 초소형 연소기의 물리적 현상을 완전히 이해하기 위해서는 초소형 연소기에서의 점화현상에 대한 좀더 근본적인 연구가 필요하다.

본 연구는 여러가지 연소기 조건에 대해서 초소형 연소기의 성능을 파악했으며 가시화를 통한 연소속도 측정을 통해 화염전파의 특성에 대해서 연구하였다. 이러한 결과물은 추후 마이크로 연소기의 연소 특성과 설계에 중요한 물리적 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술재단의 CERC 를 통한 국비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/groups/bmad/mems_reps/home.htm
- (2) Lee Dae Hoon, 2003, "Measurement and Analysis of Thermochemical Process for Micro Power Generation," Ph.D Thesis, KAIST.
- (3) Lee Dae Hoon, Lee Dae Eun Park, Yoon Joon Bo, Kwon Sejin and Yoon Euisik, 2002, "Fabrication and Test of a MEMS Combustor and Reciprocating Device," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 26~34.
- (4) Waitz, I. A., Gauba, G. and Tzeng, Y.-S., 1998, "Combustors for Micro-gas turbine engines," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 120, Issue 1.
- (5) Dae Hoon Lee and Sejin Kwon, 2002, "Thermodynamic Modeling of Heat Loss and Quenching in a Down Scaled Combustor," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 26, No. 7, pp. 919~926.
- (6) Epstein, A. H., Senturia, S. D., Anathasuresh, G., Ayon, A., Breuer, K., Chen, K.-S., Erich, F. E., Gauba, G., Ghodssi, R., Groshenry, C., Jacobson, S., Lang, J. H., Lin, C.-C., Mehra, A., Miranda, J. M., Nagle, S., Orr, D. J., Piekos, E., Schmidt, M. A., Shirley, G., Spearing, M. S., Tan, C. S., Tzeng, Y.-S. and Waitz, I. A., 1997, "Power MEMS and Microengines," *Transducers97*, Chicago, pp. 753~756
- (7) Fu, K., Knobloch, A. J., Cooley, B. A., Walter, D. C., Fernandez-Pello, C., Liepmann, D. and Miyaska, K., 2001, "Microscale Combustion Research for Applications to MEMS Rotary IC Engine," *Proceedings of ASME 35th National Heat Transfer Conference*, NHTC2001~20089.
- (8) Maruta, K., Park, J. K., Oh, K. C., Fujimori, T. and Minaev, S., 2003, "Characteristics of Microscale Combustion in Heated Channel," *The Fourth Asia-Pacific Conference on Combustion*, Nov. 23~26, Nanjing, China, pp. 44~47.
- (9) Choi Kwon Hyoung, Na Han Bee, Lee Dae Hoon and Sejin Kwon, 2004, "Numerical Simulation of Flame Propagation Near Extinction Condition in a Micro Combustor," *Microscale Thermophysical Engineering*, 8:71~89.
- (10) Lee Dae Hoon and Kwon Sejin, 2002, "Heat Transfer and Quenching Analysis of Combustion in a Micro Combustion Vessel," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 670~677.
- (11) Na Han Bee, Kim Sehoon, Lee Dae Hoon and Kwon Sejin, 2003, "Investigation on Combustion Phenomena in a Down Scaled Combustor for the Application of Power MEMS," *Proceeding of the Fourth Asia-Pacific Conference on Combustion*, August 18-21, 2003, Nanjing, China.
- (12) Rallis, C.J. and Garforth, A.M., 1980, "The Determination of Laminar Burning Velocity," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 6, pp. 303~329.
- (13) Na Han Bee, 2003, "Measurement and Analysis of Flame Propagation in Constant Volume Micro Combustor," *M. S. Thesis, KAIST*.
- (14) Turns S. R., 1996, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill, Inc.
- (15) Na Hanbee, Lee Dae Hoon and Kwon Sejin, 2005, "Combustion Characteristics and Criterion of Quenching Condition in Micro Combustor Parameterized by Initial Pressure and Fuel in the Combustor," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 29, No. 1, pp. 55~62.
- (16) McBride, B. J. and Gordon, S., 1994, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications," NASA SP-1311.
- (17) Bradley, D. and Mitcheson, A., 1976, "Mathematical Solutions for Explosions in Spherical Vessels," *Combustion and Flame*, Vol. 26, pp. 201~217.
- (18) Iijima Toshio and Takeno Tadao, 1986, "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity," *Combustion and Flame*, Vol. 6, pp. 35~43.
- (19) Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons.