

〈 논문 〉

초기 압력과 연료특성에 따른 마이크로 연소기 내에서의 연소 특성 및 소염 조건 변화

나한비* · 이대훈** · 권세진†

(2004년 7월 12일 접수, 2004년 10월 6일 심사완료)

Combustion Characteristics and Criterion of Quenching Condition in Micro Combustor Parameterized by Initial Pressure and Fuel in the Combustor

Han Bee Na, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon

Key Words : Micro Combustor (초소형 연소기), Heat Loss (열손실), Quenching(소염), Initial Pressure (초기압력)

Abstract

Combustion Characteristics and quenching criteria of micro combustor in various condition was exploited experimentally. Two different gases were used, and various geometric matrixes were considered to figure out quenching characteristic of micro combustor. The micro combustor studied in this study was constant volume, and has cylindrical shape. Geometric parameter of combustor was defined to be combustor height and diameter. The effect of height was exploited parametrically as 1mm, 2mm and 3m and the effect of diameter was parameterized to be 7.5mm and 15mm. Three different combustibles, (1) Stoichiometric mixture of methane and are, (2) Stoichiometric mixture of hydrogen and air and (3) Mixture of hydrogen and air with fuel stoichiometry of two were used. Pressure transition during combustion process was recovered. The ratio of maximum pressure to initial pressure responded favorably with the change of height of combustor and the initial pressure, the maximum pressure was also increased. The flame propagation was observed only when a specific condition was satisfied. From the experiment the condition that guarantees stable propagation of flame was tabulated. The tabulated results includes criteria of quenching according to combustor height, combustor diameter, species of fuel and initial pressure.

기호설명

- D : 연소기 직경
- H : 연소기 높이
- P_0 : 연소기내 초기 압력

1. 서론

MEMS 기술을 이용하여 기존의 장치들이 가지

* 항공우주연구원 추진제어그룹
 ** 회원, 한국기계연구원 환경기계기술연구부
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
 E-mail : melody@kaist.ac.kr
 TEL : (042)869-3721, FAX : (042)869-3710

는 성능, 크기, 가격의 한계를 극복하고 새로운 개념의 장치를 실현시키기 위한 다양한 마이크로 시스템을 구성하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이러한 마이크로 시스템은 시스템의 형상과 크기에 맞는 동력장치를 필요로 하게 된다. 기존의 동력장치는 제안되어지는 마이크로 시스템의 형상 축소 및 성능에 대한 요구사항을 만족시키지 못하므로 동력장치 자체를 MEMS 기술을 이용하여 제작하려는 시도들이 이루어지고 있다. 1990년대 후반 도입된 Power MEMS 장치가 이러한 개념이다. 마이크로 스케일에서의 열화학 반응으로부터 동력을 얻기 위한 장치개념은 마이크로 스케일에서의 고밀도 에너지 공급의 가능성으로 인해 연구되고 있으며 기존의 2차 전지에 비교하여 그 가능

성에 대한 비교는 Fig. 1에 나와 있는 바와 같다. 고밀도 에너지를 공급할 수 있는 탄화수소계열이나 수소와 같은 연료로부터 에너지를 얻기 위한 이러한 개념의 대표적인 장치들로는 마이크로 연료전지 시스템, 마이크로 발전기 시스템 등이 있다. 이러한 동력장치 혹은 마이크로 화학장치 시스템과 연계되어져서 마이크로 연소기는 시스템의 열원 및 동력원으로 가장 기본적인 요소기술로 작용하게 된다.

Power MEMS의 종류는 사용되어지는 열화학 반응의 특성과 얻어내는 에너지의 형태에 따라 몇 가지 개념의 장치들로 분류할 수 있다. 첫번째로는 연료의 연소반응을 이용하여 발생된 열에너지를 피스톤이나 터빈을 이용하여 기계적 에너지로 변경하여 직접 동작을 얻어내거나 동력으로부터 이차적으로 전기적 에너지를 생산하는 초소형 엔진의 개념을 들 수 있으며⁽²⁻⁴⁾ 두 번째로는 촉매연소를 이용하여 열에너지를 얻어내는 초소형 촉매반응기가 있다.^(5,6) 세번째로는 전기화학적 반응으로부터 전기적 에너지를 직접 얻어내는 초소형 연료 전지가 있으며⁽⁷⁾ 마지막으로 효소 반응을 이용하여 특정한 물질을 매우 작은 스케일로 생산해 내거나 ATP (Adenosine Tri-Phosphate), ADP (Adenosine Di-Phosphate)와 같은 생화학 포텐셜을 얻어내는 초소형 반응기가 있다.^(8,9)

이중 Micro Combustor는 Micro Engine의 핵심 요소로 연소 반응을 얻어내거나, 마이크로 연료전지, 마이크로 화학반응기 등의 열원으로 사용되어지는 마이크로 동력장치의 기본 요소의 역할을 가진다. MEMS 공정으로 제작되는 마이크로 연소기의 크기 및 형상을 고려할 때 연소기는 매우 큰 표면적 대 부피 비를 가진다. 연소기에서 표면적 대 부피 비가 크다는 것은 상대적으로 열에너지 생산에 비해 열손실이 크다는 것을 의미한다. 따라서 마이크로 연소기의 개발 및 이를 이용한 응용장치의 개발은 이러한 열손실이 화염의 형성 및

전파에 가져오는 영향에 대한 정성적이고 정량적인 연구를 필요로 한다. 기존의 마이크로 연소기에 대한 연구는 연소 현상, 연소 과정시의 화학적, 열적 특성보다는 작은 크기와 2차원적 형상을 가지는 연소기에 대한 제작 가능성을 확인하는 차원에서 수행되어져 왔으며 작은 스케일의 정상상태의 정압 연소기 및 정적 연소기에 대해 수행되어져 왔다.^(10,11) 마이크로 연소기를 고려할 때 증가된 열손실이 연소기내 압력 상승 및 화염전파에 어떠한 형태로든 영향을 끼칠 것이란 예상을 할 수 있다. 하지만 실제로 이러한 영향이 연소기의 연소 특성을 정량적으로 얼마나 저하시키는지, 과도한 열손실이 화염의 전파를 불가능하게 하는 영역은 어떠한지를 알아 보는 것은 마이크로 연소기의 운용범위와 설계에 있어 기본적인 물리적 근거가 될 수 있다.

본 연구에서는 Lee et al⁽¹¹⁾에 의해 수행된 초소형 연소기 실험을 확장하여 연소기 형상, 연료의 종류 등을 변화시켜 가면서 소염발생조건에 대한 정량적인 조건들을 얻어내었다. 압력 측정과 가시화를 통해 얻어진 결과는 마이크로 연소기의 설계와 작동특성에 따른 운용범위에 대한 제한조건을 제시하는 근거 자료로 사용되어 질 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 목적은 다양한 조건에서의 초소형 연소기의 성능을 알아보면서 추후 연소기 설계시의 성능을 미리 예측하는 데에 있다. 따라서 초소형 연소기의 기초연구를 위하여 몇 가지 크기의 연소기를 제작하였다. 본 연구에서는 연소 성능을 알아보는 것이기 때문에 MEMS 기술을 이용하여 초소형 연소기를 제작하지 않았고, 기계가공을 통해서 연소기를 제작하였다. 먼저 연소기의 크기가 연소특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 연소기의 높이와 지름이 다른 연소기를 제작하였다. 먼저 연소기 높이의 영향을 알아보기 위해서 연소기 지름이 15mm인 경우에 대하여 연소기의 높이가 1mm, 2mm, 3mm인 연소기를 제작하였고 연소기 지름의 영향을 알아보기 위해서 연소기 높이 2mm에 대해서 지름이 7.5mm인 연소기를 제작하여 15mm인 경우와 비교할 수 있도록 하였다. Lee et al⁽¹¹⁾에 의해 수행된 기존의 마이크로 정적 연소기에 대한 실험에서는 높이 변화가 가능한 구조의 특성상 가시화가 직접 촬영의 방법밖에 없었지만 본 실험에 사용된 연소기는 연소기의 상하면

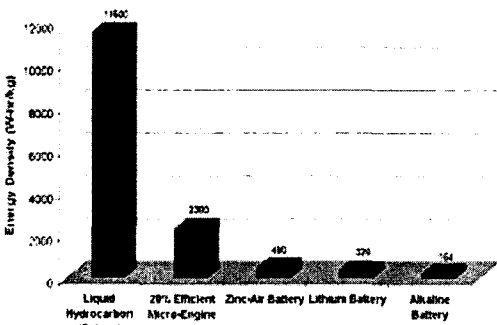


Fig. 1 Energy Density of various energy sources⁽¹⁾

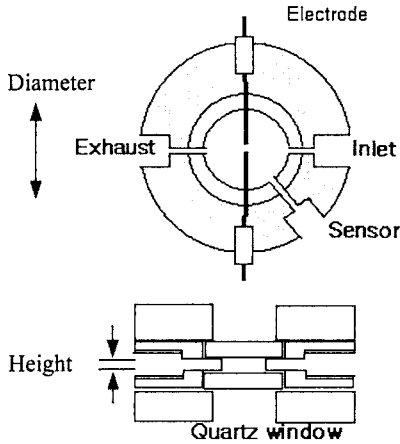


Fig. 2 Schematic of combustor

이 가시화가 가능한 쿼트로 제작되어 있어서 화염의 전파에 대한 가시화가 가능하도록 제작되었다. 제작된 연소기의 개념도는 Fig. 2와 같다. MEMS 공정을 통해 제작될 마이크로 연소기의 형상을 고려해서 연소기의 높이는 낮고 면적이 넓은 형태로 제작하였다. 연소기는 샌드위치 형태로 되어 있고 총 부품의 수는 5개이다. 연소실을 형성하는 벽면의 역할을 하는 중간층은 점화장치에 대한 전기적 절연을 고려하여 아세탈로 제작하였으며 중간층 구조물을 통하여 연료의 주입과 배출, 압력센서의 연결 그리고 방전으로 인한 점화장치를 연결하도록 되어 있다. 중간층 구조물의 위 아래는 쿼트유리를 부착하여 가시화를 위한 창 역할을 하도록 하였다. 연소기의 중간층과 상하면의 쿼트 창은 알루미늄 덮개로 고정시키도록 하였다.

연소기에 연결된 압력센서는 게이지 타입 센서이며 압력센서는 연소기의 벽면에 연결된 홀에 연결되어 있다. 정적 연소기의 경우는 연소기내의 압력의 구배가 없다고 가정할 수 있기 때문에⁽¹²⁾ 연소기 끝 벽면에서의 압력을 측정함으로써 연소기 전체의 압력을 구할 수 있다. 사용된 압력 센서는 Kulite 사의 ETM-375-450A 이다. 이 센서의 측정범위는 0 psia (0 kPa) 에서 450 psai (3200 kPa) 이고 실험에 데이터 획득은 5000Hz 조건으로 수행되었다. 센서의 출력은 National Instrument 사의 A/D 변환장치를 이용하여 컴퓨터로 전달된다.

실험에 사용된 예혼합 기체는 가스 실린더에서 압력조정이 가능하도록 중간챔버를 통해 연소기에 공급된다. 연소기내의 혼합기체의 점화는 Power TR 로 구성된 전자회로의 스위칭 시 얻어진 유도 코일에서의 고전압으로부터 얻어진 전극의 방전으로 얻었다. 공급되어진 점화 에너지는 1~2mJ 정도의 값으로 최소 점화 에너지의 수십 배에서 백배

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

에 이르는 충분한 점화 에너지를 가하였다.

실험을 수행하는 과정은 예혼합 가스를 원하는 압력조건으로 마이크로 연소기에 주입을 한후 연소기를 밀폐시키고 점화회로를 가동하여 점화를 시켰다. 연소 도중의 시간에 따른 압력 곡선은 컴퓨터로 입력 받았으며, 화염의 전파를 슈리렌 (Schlieren) 방법을 이용하여서 가시화 하였다. 연소반응 후 연소기 내의 기연가스는 연료 주입 밸브를 통해 새로운 미연가스의 충전과 함께 배출되도록 설계하였다.

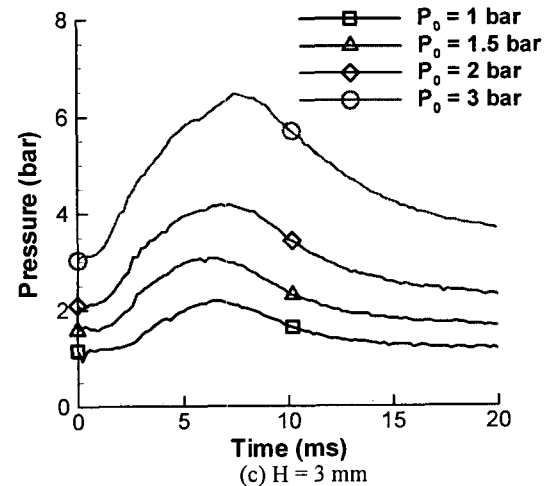
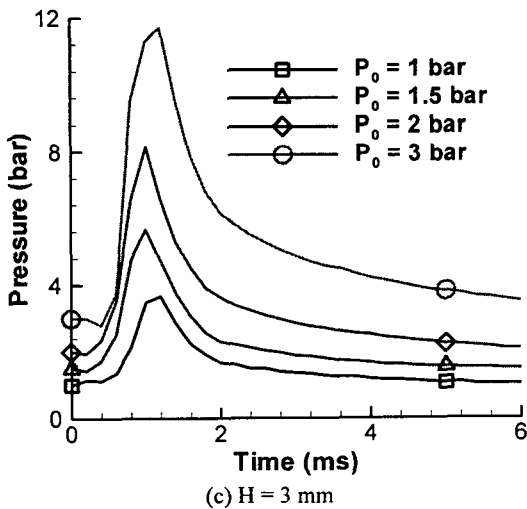
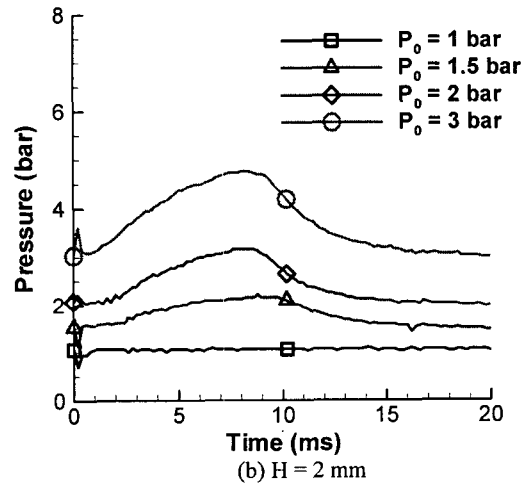
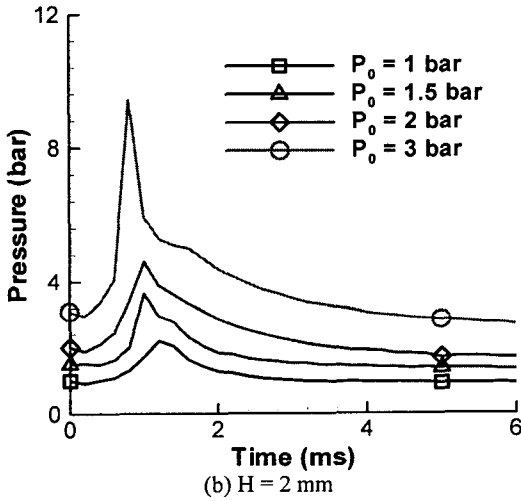
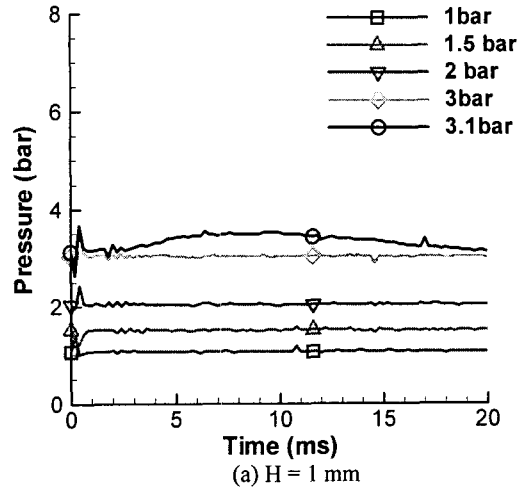
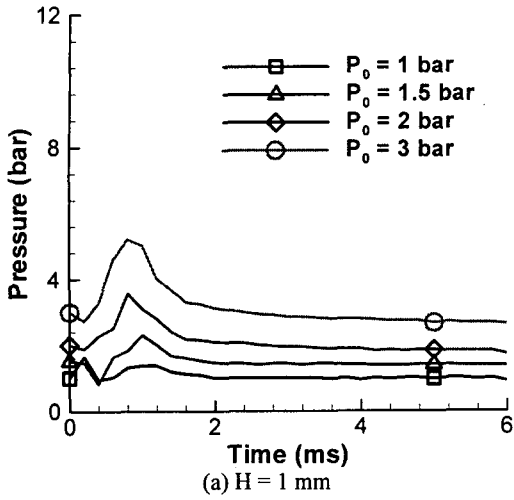
2.2 실험조건

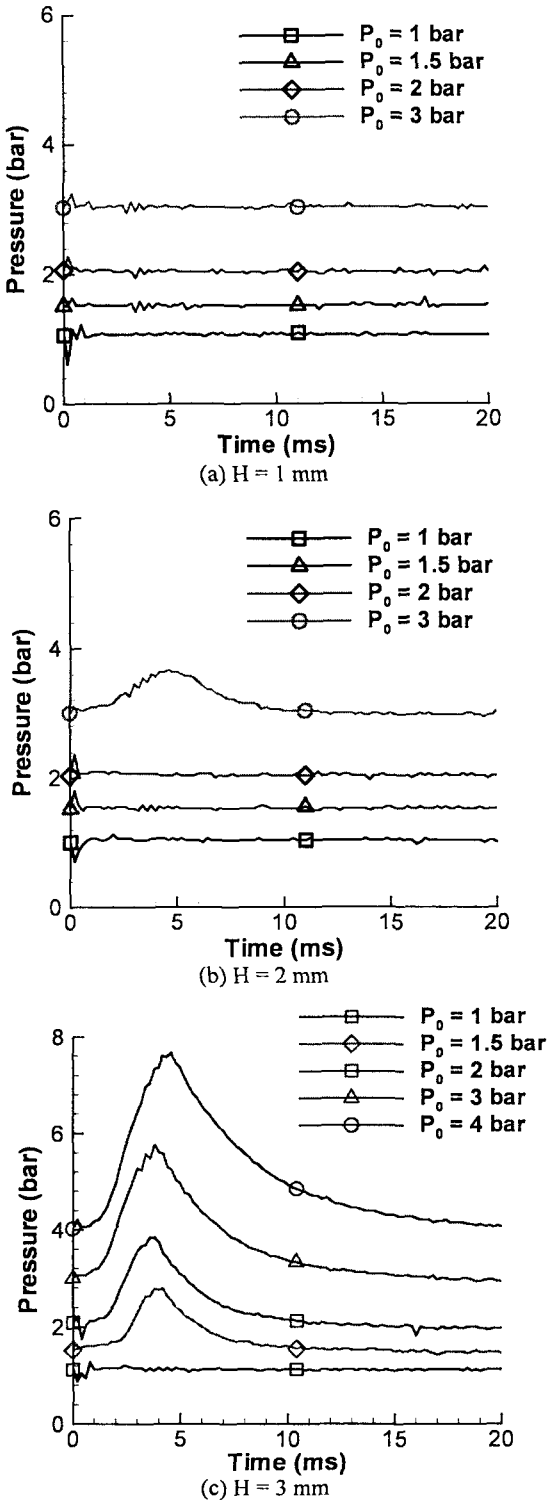
연소기의 크기가 연소특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 높이 및 직경이 다른 여러 가지 연소기를 제작하였다. 먼저, 연소기의 지름이 15mm 인 경우에 대해서, 연소기의 높이가 1mm, 2mm, 3mm 로 조정하여 제작을 하였다. 또한 연소기의 지름이 연소특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 연소기의 지름이 7.5mm 이고 높이가 2mm 인 연소기를 제작 하였다. 연소기 형상에 대한 설계 변수는 Table 1과 같다. 연소기의 초기 압력은 1 bar, 1.5 bar, 2 bar, 3 bar 로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였고, 추가적으로 소염이 발생하는 압력 조건 부근에서는 좀 더 정확한 조건을 찾기 위하여 0.1 bar 씩 압력을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 당량비 2인 수소와 공기의 혼합기체에 대해서는 추가적으로 초기 압력이 4 bar 인 경우에 대하여도 실험을 수행하였다. 연소기에 사용된 예혼합 가스는 당량비가 1, 2인 수소와 공기의 혼합기체와 당량비가 1인 메탄과 공기의 혼합 기체였다.

3. 결 과

3.1 연소기내의 압력 변화

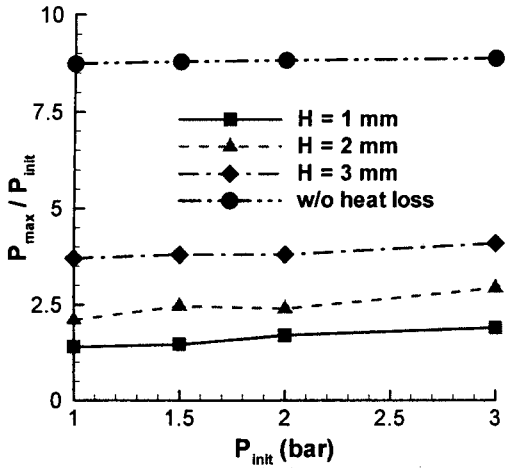
실험조건에 제시된 각 경우에 대해 점화 및 점화로 인한 압력 변화를 측정하였다. Fig. 3 에는 각 연소기 직경을 15mm 로 고정된 상태에서 연소기 높이를 변화시켜 가면서 연소기내 초기 압력 변화에 따른 연소반응 전후의 압력변화를 비교한 결과

Fig. 3 Pressure transition($\phi = 1$ H_2 & Air, $D = 15$ mm)Fig. 4 Pressure transition($\phi = 1$ CH_4 & Air, $D = 15$ mm)

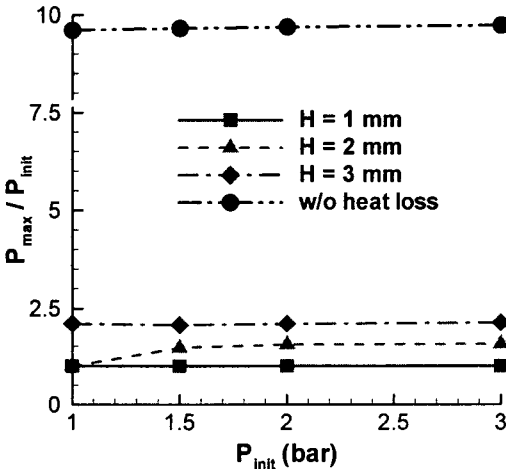
Fig. 5 Pressure transition ($\phi = 2 \text{ H}_2$ & Air, $D = 15 \text{ mm}$)

가 제시되어 있다. 초기압력과 연소기 높이에 따라 화염의 전파에 따른 압력 상승의 정도가 달라지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 같은 연소기 조건에서 연료를 메탄과 공기의 예혼합 가스로 변경했을 때의 결과이다. 수소 공기 예혼합 기체보다 느린 연소속도로 인해 최고 압력에 도달하는 시간이 느려지는 것을 확인할 수 있고 초기 압력과 연소기 높이에 대한 압력상승의 변화는 수소 공기 예혼합 기체의 경우와 같은 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에 나와 있는 바와 같이 당량비 2인 수소 공기 혼합기체의 경우 당량비 1일 때에 비해 화염이 전파되지 않는 경우가 발생하였다. Fig. 3~5를 통해 각 연료 조건에서의 소염 조건이 초기 압력과 연소기 높이에 어떠한 영향을 받는지를 확인할 수 있다. 메탄 공기 예혼합 기체의 경우 연소기 높이 1 mm에서는 초기압력 3.1 bar 보다 작은 압력에서는 압력상승, 즉 화염의 전파가 관찰되지 않고 연소기 높이 2 mm에서는 1.5 bar 보다 작은 압력에서는 화염의 전파가 관찰되지 않으며 당량비 2인 수소 공기의 예혼합 가스의 경우 연소기 높이 1mm에서는 초기압 6 bar에서도 압력상승이 없었으며 연소기 높이 2mm에서 3 bar, 연소기 높이 3mm에서 1.3 bar 정도의 한계 조건을 보여주었다. 당량비 2 수소혼합 가스인 경우 연소기의 직경이 소염 조건에 영향을 주며 다른 경우는 영향을 주지 않는 것이 관찰되었다. 이는 연소기의 최소 스케일인 높이가 소염 조건에 큰 영향을 주는 인자임을 의미한다.

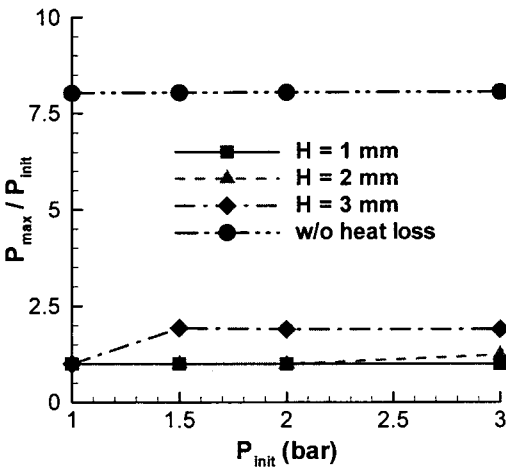
화염전파가 발생할 시 연소반응으로부터 얻어지는 최고 압력과 초기 압력의 비에 대한 결과가 Fig. 6에 제시되어 있다. 압력비 1은 화염의 전파가 없어서 압력 상승이 발생하지 않은 결과이다. 초기 압력 대 최고 압력의 비는 각 연소기 높이에 따라 대략 일정한 값을 가지는 것으로 관찰되었다. 즉 연소기 높이가 결정이 되면 초기 압력 대 최고 압력의 비가 결정되어 지는 것이다. 이러한 결과는 마이크로 연소기 설계시 성능 예측에 있어서 초기압 조건에 따른 성능 평가에 중요한 결정인자로 사용될 수 있다. 또한 이 결과는 연소기의 최소 스케일인 높이가 형상 축소된 연소기에서의 열손실 특성에 대한 결과적인 파라미터가 될 수 있음을 의미하는 것이다. 즉 연소기의 스케일과 열손실로 인한 연소기의 성능 변화에 대한 정량적 함수 관계에 대한 특성을 보여 주는 것이다. Fig. 6에는 각 실험 조건에 대한 결과가 곡선으로 연결되어져 있지만 연소기내 화염의 전파는 특정한 조건을 전후로 불연속적인 특성을 보여준다.



(a) H₂/Air, $\phi=1$, D=15mm



(b) CH₄/Air, $\phi=1$, D=15mm



(c) H₂/Air, $\phi=2$, D=15mm

Fig. 6 Maximum to initial pressure ratio in each test condition

Table 2 Quenching condition parameterized by initial pressure in each test case(bar)

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

3.2 소염 조건

압력 변화에 대한 실험 결과로부터 다른 연료와 다른 당량비 조건에 대해 화염 전파가 가능한 영역을 얻을 수가 있었다. 이러한 결과를 각 실험조건에 대해 소염 조건을 표로 정리하면 Table 2 와 같다. 연료와 당량비에, 초기 압력과 연소기 스케일에 따라 발생하는 열량과 화염전파속도, 열손실 특성등이 달라져서 소염조건이 형성되는 특성을 이해할 수가 있다. 이를 통해 마이크로 연소기에서는 이론 당량비에 근접하고 연소기 전체의 크기가 아닌 최소 스케일에 대한 설계 인자가 화염을 안정되게 연기 위해 필요한 조건임을 알 수 있다. 또한 발열량과 손실량의 상대적 크기를 확보하기 위해 초기압 조건 혹은 열 손실 조건에 대한 제어가 필요함을 확인할 수 있다.

3.3 연소기 길이 스케일의 영향

연소기의 최소 길이 스케일이 연소기 특성에 미치는 영향을 좀 더 정량적으로 이해하기 위해 각 조건에서의 최대압 대 초기압력의 비를 구하여 비교해보았다. 압력비는 연소기 초기 압력에 큰 영향을 받지 않고 높이에 따라 거의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 6 에 실험에 사용된 각 경우의 압력비가 열손실 없이 이론적으로 얻을 수 있는 최대의 압력비와 비교되어 나타나 있다. 열손실이 없을 경우의 주어진 연소기에서의 이론적 최대 압력은 초기온도 295K 조건으로 NASA 에서 개발한 평형조건 계산 코드인 CEC 프로그램에 이

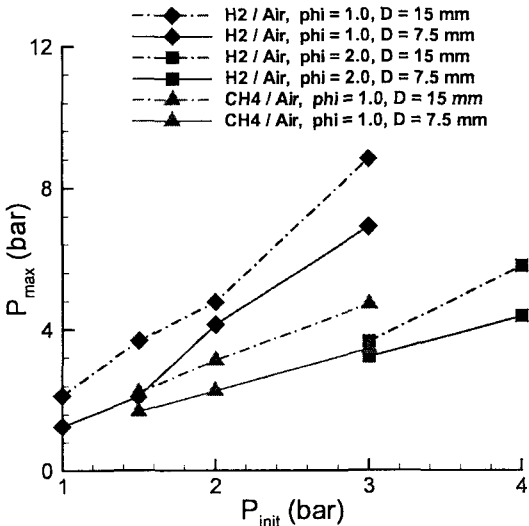


Fig. 7 Effect of combustor diameter on maximum pressure

용해 구하였다. 소염조건에 가까워 질수록 즉 소염이 발생하는 연소기 높이, 초기압 조건에 근접할수록 압력비 값이 1 즉 화염 전파가 없는 경우로 접근해 가는 것을 알 수 있다. 전체적인 압력비의 경향을 통해 주어진 연소기 형상에서의 소염에 근접한 정도와 연소기 성능 저하의 정도를 확인할 수 있다. Fig. 7에는 연소기의 지름이 최고압력에 미치는 영향이 제시되어 있다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 전반적으로 연소기 지름이 작아지면서 최고압력이 다소 저하되는 경향을 보여 준다. 이것은 화염이 전파되어 가는 연소기 길이방향 스케일의 증가로 인한 화염 전파시간의 증가로 압력상승이 발생한 것이 그 원인이다. 또한 구형이나 다른 형태의 연소기의 경우 표면적대체적비가 길이 스케일의 역수로 표현되지만 본 실험에 사용된 납작한 실린더 형의 연소기의 경우 표면적대체적 비의 길이 스케일에 따른 변화가 상대적으로 매우 작아져서 일정한 값에 가까워진다. 즉 직경이 늘어나면서 증가하는 발열량의 효과가 증가하는 열손실의 효과보다 상대적으로 더 커지게 된다. 그래서 직경이 작은 경우 표면적대체적비 S/V 가 상대적으로 더 작음에도 불구하고 열손실 효과가 상대적으로 커지게 된다. 이에 따라 연소기 지름이 소염 특성에 미치는 영향은 당량비 1인 수소, 메탄 각각의 혼합가스에서는 발견되지 않았으며 당량비 2인 수소 혼합가스에서는 일부 영향이 관찰되었으나 전체적으로 소염 자체는 연소기의 최소 스케일에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

이상의 결과들을 볼 때 소염 특성은 최소 스케일에 대한 제한 조건으로, 연소를 통한 압력상승은 화염이 전파되는 공간의 스케일을 통해 연소기 성능에 대한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

소염 조건에 근접하는 연소기 형상 및 스케일에서 연소기의 특성조건이 소염에 미치는 영향을 알아보고 각 조건별로 소염이 발생하는 영역을 확인하였다. 이를 위해 mm 스케일에서 다양한 크기의 높이와 직경을 가지는 실린더 형의 연소기를 제작하였고 연료의 종류와 당량비를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 조건에 따른 화염의 전파 가능성과 소염 특성을 알아보기 위한 연소실험에서는 이론 당량비 조건과 과연료 조건의 비교에서 과연료 조건에서 화염이 전파되지 않고 소염되기 쉬운 것을 확인하였고 연소기의 형상에 대해서는 연소기 높이가 작아질수록, 연소기 초기 압력이 낮아질수록 화염이 전파 될 수 있는 한계 조건이 강화되어 소염이 더 잘 발생한다는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로부터 실험된 조건들에 대하여 화염전파 가능한 영역의 표를 얻을 수 있었다. 기존 문헌의 연소 조건이 압력이나 연소기 형상에 대한 조건 없이 제시되어 있는 값인데 반해 본 결과를 통해 소염 조건에 영향을 주는 요인들과 그 영향에 대한 정략적인 관찰이 가능해지게 되었다.

화염이 전파될 경우 소염 조건에 가까워 질수록 연소반응을 통해 얻을 수 있는 압력 상승은 점차 감소해 소염 조건의 초기 압력 대 최고 압력비 1을 향해 진행한다는 것을 확인하였다. 이를 통해 연소기의 최소 스케일은 소염의 발생 가능성에 대한 파라미터가 되고 화염이 전파되어 지는 연소기의 최장 스케일은 압력 상승 값에 대한 파라미터가 될 수 있는 것으로 본 연구에서 결론 내릴 수 있었다. 이러한 결과는 추후 마이크로 연소기의 연소 특성과 설계에 중요한 물리적 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 CERC 를 통한 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) <http://www.me.berkeley.edu/mrcrl/why.html>.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Dae Hoon Lee, Dae Eun Park, Joon Bo Yoon, Sejin Kwon and Euisik Yoon, 2002, "Fabrication and Test of a MEMS Combustor and Reciprocating Device," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 26~34.
- (5) Srinivasan, R., Firebaugh, S. L., Hsing, I. M., Ryley, J., Harold, M. P., Jensen, K. F. and Schmidt, M. A., 1997, "Chemical Performance and High Temperature Characterization of Micromachined Chemical Reactors," *Transducers 97. International Conference on Solid State Sensors and Actuators* 1C3.01.
- (6) Jenifer Brakel, 2001, "Microreactors : An Invention of the Future," *Chemical Reaction Engineering Weekly News*, April 9, Univ. Michigan.
- (7) Sukhan Lee and Yonggyo Seo, 2002, "The Status of Micro Fuel Cell Research in Korea," *Proceeding of Power MEMS 2002, International Workshop on Power MEMS*, Tsukuba, Japan, pp. 10~13.
- (8) Jiang, Y. and Lee, C. S., 2001, "On-Line Coupling of Micro-Enzyme Ractor with Micro-Membrane Chromatography for Protein Digestion, Peptide Separation, and Protein Identification Using Eectrospray Ionization Mass Spectrometry," *J Chromatogr A*. 2001 Jul 27; 924(1-2): 315-22.
- (9) Tomohiro Taniguchi, Toru Torii and Toshiro Higuchi, 2001, "Micro Chemical Reactor in Micro Droplets-Electrostatic Manipulation of Micro Droplets," *Proceedings of ISMM2001*, pp. 104~105.
- (10) Waitz, I. A., Gauba, G. and Tzeng, Y.-S., 1998, "Combustors for Micro-Gas Turbine Engines," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 120, Issue 1.
- (11) Lee, D. H. and Kwon, S., 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.
- (12) Rallis, C. J. and Garforth, A. M., 1980, "The Determination of Laminar Burning Velocity," *Prog. Eng Combust. Sci.*, Vol. 6. pp. 303~329.