

## 초소형 정적 연소기에서의 연소 한계에 대한 실험적 연구

나한비\* · 권세진\*\* · 김세훈\*\* · 이대훈\*\*\*

### Experiment on the Limit Scale of Combustion in Constant Volume Micro Combustor

HanBee Na<sup>\*</sup> · Sejin Kwon<sup>\*\*</sup> · Sehoon Kim<sup>\*\*</sup> · Daehoon Lee<sup>\*\*\*</sup>

#### ABSTRACT

The Performance of micro combustor in various condition was exploited experimentally. Various geometric conditions of combustor were considered to figure out the performance of micro combustor. The micro combustor studied in this study was constant volume with cylindrical shape. Geometric parameters of combustor were defined to be combustor height and diameter. The effect of height was exploited parametrically with the size of 1mm, 2mm and 3mm. The effect of diameter was observed parameterized with 7.5mm and 15mm. Three different combustibles or Stoichiometric mixture of methane/air, hydrogen/air were used. Pressure transition during combustion process was recorded. The maximum pressure by combustion responded favorably with the change of height of combustor and the initial pressure. The flame propagation was visualized using Schlieren method. The flame propagation within combustor was observed when specific conditions such as combustor height and initial pressure over critical value was satisfied.

#### 초 록

초소형 정적 연소기의 연소 성능에 대한 실험을 수행하였다. 연소기 형상과 크기의 영향을 알아보기 위해 몇 가지 형태의 연소기를 제작하였다. 연소기는 납작한 원통형 정적 연소기로써 연소기의 지름이 15 mm인 경우에 대해서 높이가 1 mm, 2 mm, 3 mm 인 것을 제작하였고, 지름의 영향을 알아보기 위해서 연소기의 높이와 지름이 각각 2 mm 와 7.5 mm 인 것을 제작하였다. 사용된 연료는 당량비 1인 메탄과 공기의 혼합기체와 당량비 1과 2인 수소와 공기 혼합 기체이다. 실험을 통하여 연소중의 압력 변화를 측정하였다. 최대 압력은 연소기의 높이와 초기 압력이 증가할수록 증가하였다. 화염의 전파를 쉐리렌 방법을 이용하여 가시화를 하였다. 열손실의 영향을 극복하고 화염의 전파가 가능하게 하는 초기 압력을 제시하였다.

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

#### 1. 서 론

† 2003년 7월 20일 접수 ~ 2003년 9월 27일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

\*\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 정보전자연구소

연락처, E-mail: eternal@kaist.ac.kr

최근 마이크로 가공 기술의 발달과 함께 다양한 마이크로 시스템을 구성하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이와 함께 마이크로 시스템의 형상과 크기에 맞는 동력장치에 대한 필요

가 증대되었다. Fig 1 에서와 같이 기존의 동력장치는, 제안된 마이크로 시스템의 형상 축소 및 성능에 대한 요구사항을 만족시키지 못하므로 동력장치 자체를 MEMS기술을 이용하여 제작하려는 시도들이 이루어지고 있다. 1990년대 후반 도입된 Power MEMS장치가 이러한 개념이다.

Power MEMS 개념은 마이크로 스케일에서의 고밀도 에너지 공급의 가능성으로 인해 연구되고 있으며 기존의 2차 전지와 비교하여 그 가능성을 주목받고 있다. 이러한 개념의 대표적인 장치들로는 마이크로 연료전지 시스템, 마이크로 발전기 시스템 등이 있다. 이러한 동력장치 혹은 마이크로 화학 장치 시스템과 연계되어 마이크로 연소기는 시스템의 열원 및 동력원으로 가장 기본적인 요소기술로 작용하게 된다.

Power MEMS 는 반응의 특성과 얻어내는 에너지의 형태에 따라 몇 가지 개념의 장치들로 분류할 수 있다. 연료의 연소반응을 이용하여 발생된 열에너지를 피스톤이나 터빈을 이용하여 기계적 에너지 혹은 전기적 에너지로 변환해서 생산하는 초소형 엔진의 개념을 들 수 있으며 [1~3] 두 번째로는 촉매연소를 이용하여 열에너지를 얻어내는 초소형 촉매 반응기가 있다. 세 번째로는 전기화학적 반응으로부터 전기적 에너지를 직접 얻어내는 초소형 연료 전지가 있으며[4] 이중 마이크로 연소기는 마이크로 엔진 및 고온 마이크로 화학 장치의 핵심 요소로 연소 반응을 얻어내거나, 마이크로 연료전지, 마이크로 화학 반응기 등의 열원으로 사용되는 마이크로 동력 장치의 기본 요소가 된다.

MEMS 공정으로 제작되는 마이크로 연소기의 크기 및 형상을 고려할 때 연소기는 매우 큰 표면적 대 부피 비를 가진다. 연소기에서 표면적대 부피 비가 크다는 것은 상대적으로 열에너지 생산에 비해 열손실이 크다는 것을 의미한다. 따라서 마이크로 연소기의 개발 및 이를 이용한 응

용장치의 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[5] 및 정적 연소기에 대해 수행되어져 왔다 [5]. 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 알아보는 것은 마이크로 연소기의 운용범위와 설계에 있어 기본적인 물리적 근거가 될 수 있다.

본 연구에서는 Lee et al [6] 에 의해 수행된 초소형 연소기 실험을 확장하여 연소기 형상, 연료의 종류 등을 변화시켜 가면서 소염발생조건에 대한 정량적인 조건들을 얻어내었다. 얻어진 결과는 마이크로 연소기의 설계와 작동특성에 따른 설계 등에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1. 실험

#### 2.1.1. 실험 장비

실험을 통해 다양한 조건에서의 초소형 연소기의 성능을 알아보았다. 실험을 위해 몇 가지 크기의 연소기를 제작하였다. 본 연구의 목적은 연소 성능을 알아보는 것이기 때문에 마이크로 가공 기술이 아닌 기계가공을 통해서 연소기를 제작하였다. 먼저 연소기의 크기가 연소특성에

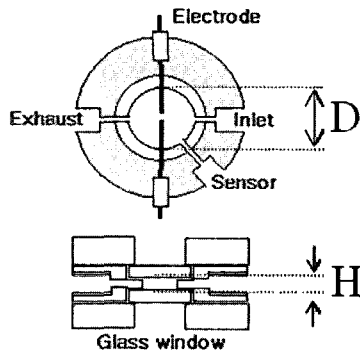


Fig. 1 Micro Combustor

Table 1. Combustor geometry matrix

Combustor Geometries		Height (mm)		
		1	2	3
Diameter	15	o	o	o
	7.5	N/A	o	N/A

미치는 영향을 알아보기 위해서 연소기의 높이와 지름이 다른 연소기를 제작하였다. 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[6]에 의해 수행된 기존의 마이크로 정적 연소기에 대한 실험에서는 높이 변화가 가능한 구조의 특성상 가시화가 직접 촬영의 방법밖에 없었지만 본 실험에 사용된 연소기는 연소기의 상하면이 가시화가 가능한 퀴츠 유리로 제작되어 있어서 화염의 전파에 대한 가시화가 가능하도록 제작되었다.

제작된 연소기의 개념도는 Fig. 1 과 같다. MEMS 공정을 통해 제작될 마이크로 연소기의 형상을 고려해서 연소기의 높이는 낮고 면적이 넓은 형태로 제작하였다. 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 위아래는 퀴츠유리를 부착하여 가시화를 위한 창 역할을 하도록 하였다. 연소기의 중간층과 상하면의 퀴츠 창은 알루미늄 덮개로 고정시키도록 하였다.

연소기에 연결된 압력센서는 게이지 타입 센서이며 압력센서는 연소기의 벽면에 연결된 홀에 연결되어 있다. 정적 연소기의 경우는 연소기 내의 압력의 구배가 없다고 가정할 수 있기 때문에 연소기 끝 벽면에서의 압력을 측정함으로써 연소기 전체의 압력을 구할 수 있다. 압력 신호는 5kHz조건으로 신호를 받았다.

실험을 수행하는 과정은 예혼합 가스를 원하는 압력조건으로 마이크로 연소기에 주입을 한 후 연소기를 밀폐시키고 점화회로를 가동하여 점화를 시켰으며 연소 후 연소기 내의 기연가스는 연료 주입 밸브를 통해 새로운 미연가스 연료로 교환된다.

### 2.1.1. 실험 조건

실험을 위해 제작된 연소기 형상에 대한 설계 파라미터는 Table 1 에 제시된 바와 같다. 총 4 가지의 연소기를 제작하였다.

연소기의 초기 압력은 1 bar, 1.5 bar, 2 bar, 3 bar 에 대해 연소 실험이 수행되었고, 추가적으로 연소기의 높이가 낮아서 소음이 발생할 때에 화염의 전파를 위한 최소 압력을 0.1 bar 씩 조정해 가면서 얻어 내었다. 연소기에 사용된 예혼합 가스는 당량비가 1인 수소와 공기의 혼합기체와 당량비가 1인 메탄과 공기의 혼합 기체였다.

## 2.2. 실험결과

### 2.2.1. 연소기내에서의 압력 변화

실험조건에 제시된 각 경우에 대해 점화 및 점화로 인한 압력 변화를 측정하였다. Fig. 2와 Fig. 3는 각 연소기 직경을 15mm 로 고정한 상태에서 연소기 높이를 변화시키면서 연소기내

초기 압력 변화에 따른 연소반응 전후의 압력변화를 비교한 결과이다. 초기압력과 연소기 높이에 따른 압력 상승 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 2는 당량비 1인 수소와 공기의 혼합기체의 실험 결과이다. 연소기의 높이가 1 mm 일 때 1 bar 초기 압력일 경우 압력상승이 아주 미미해지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 당량비 1인 메탄 공기 혼합기체의 결과이다. 수소 공기 예혼합 기체보다 느린 연소속도로 인해 최고 압력에 도달하는 시간이 느려지는 것을 확인할 수 있고 연소기 높이 1 mm의 실험 결과에서는 초기 압력 3 bar 까지 압력의 변화가 없었다. 이는 연소기 높이 1 mm인 경우에 대해서 당량비 1인 메탄과 공기의 혼합기체의 경우 초기 압력이 3 bar 까지 가압을 하더라도 열손실의 영향 때문에 화염의 전파가 되지 않는 것을 의미한다. 연소기 높이 2 mm에서는 1.5 bar 보다 작은 압력에서는 화염의 전파가 관찰되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 작은 공간에서 최소 길이 스케일에 따른 연소기내 초기 압력 조건에 대한 화염의 전파 가능성을 확인 하였고 압력 결과를 얻어 내었다.

### 2.2.2 화염 전파 가능성의 가시화

화염전파 특성을 관찰하기 위해 Schlieren 방법을 이용한 가시화를 수행하였다. 압력 측정과 가시화를 동시에 측정하여 압력 변화 특성이 가시화를 통해 어떻게 확인될 수 있는지 알아보았다. Fig. 4 (a)는 메탄 공기 혼합기체에서 초기압 3 bar 일 때의 화염 전파의 가시화 결과이며 Fig. 4 (b)는 메탄 공기 혼합기체에서 초기압 3.1 bar 일 때의 결과이다. 압력 측정을 통해 알 수 있었던듯이 초기압 3 bar를 기준으로 화염 전파가 가능해지는 경계가 결정되는 것을 명확히 알 수 있다.

### 2.2.3 화염의 전파를 위한 조건

Fig. 3에서와 같이 어떤 조건 하에서는 화염이 전파를 하지 않아서 연소기내의 압력 변화가 거의 없었다. 이것은 초기 방전과 점화에 의한

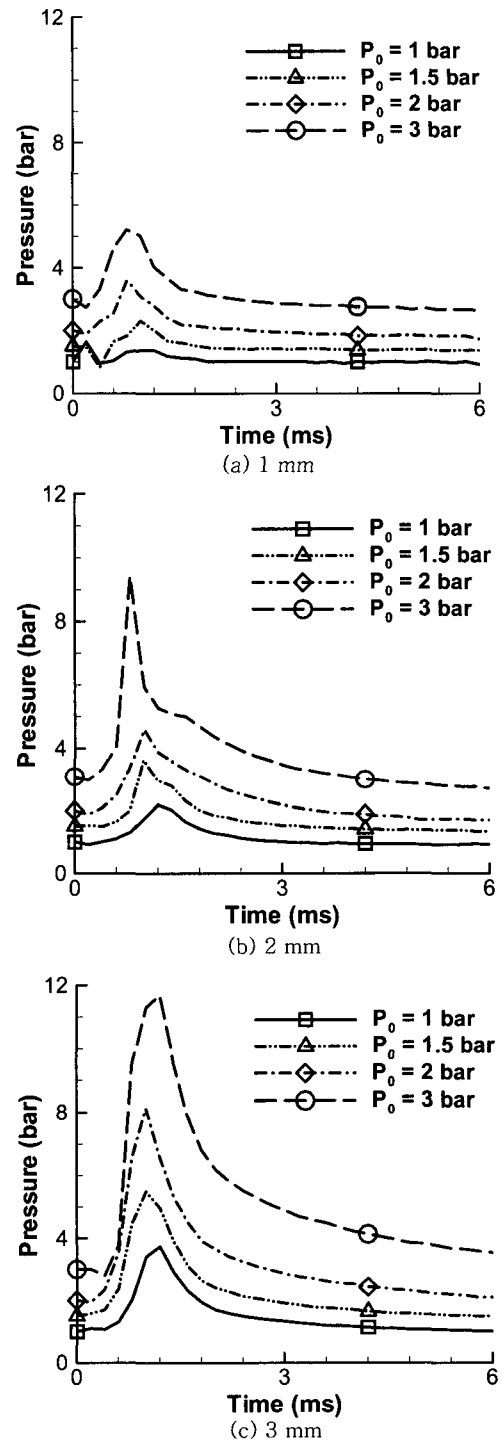


Fig. 2 Pressure transition,  $H_2/Air$ ,  $\phi=1$

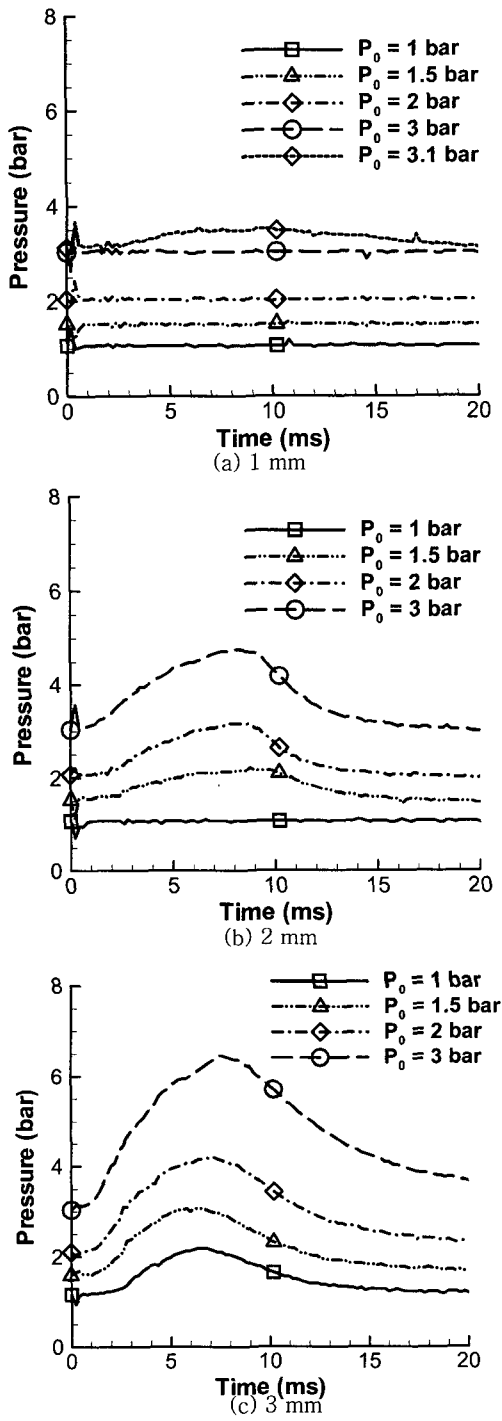


Fig. 3 Pressure transition, CH<sub>4</sub>/Air,  $\phi=1$

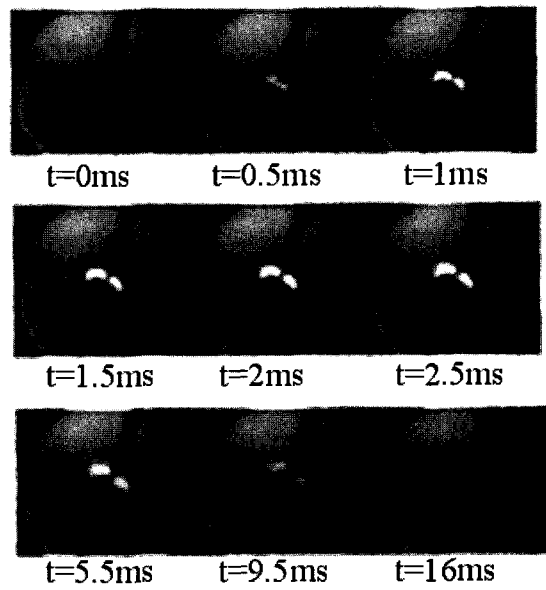


Fig. 4 Flame visualization, CH<sub>4</sub>/Air,  $\phi=1$ ,  $P_0=3.0$  bar

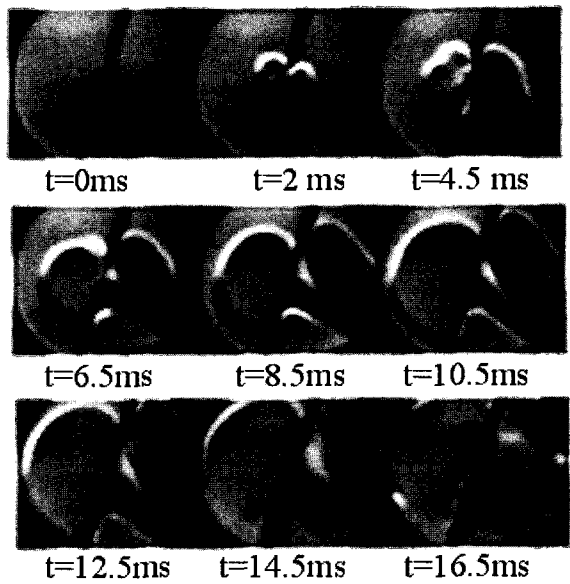


Fig. 5 Flame visualization, CH<sub>4</sub>/Air,  $\phi=1$ ,  $P_0=3.1$  bar

Table 2. Minimum pressure for flame propagation ( CH<sub>4</sub>/Air,  $\phi=1$ )

Minimum initial pressure for flame propagation (bar)				
Diameter	Height	1mm	2mm	3mm
	7.5 mm	NA	1.3	NA
	15 mm	3.1	1.3	1.0

(NA=not available)

에너지의 발생보다도 연소기의 벽면을 통한 열손실이 더 크기 때문에 화염의 전파가 발생하지 않는 것이다. 연소기의 높이가 낮을수록 열손실이 커져서 화염의 전파가 불가능한 영역이 커지게 된다. 화염전파가 가능한 최소 거리를 의미하는 소염거리 (Quenching Distance) 에 대해서 본 실험에서 얻어진 결과를 이용해서 연소기 최소 스케일과 초기 압력 조건에 따라 정리를 하면 메탄과 공기의 혼합 기체에 대해서 Tabel 2 에 나와 있는 바와 같이 표로 정리할 수 있다.

당량비 1인 수소와 공기의 예혼합 가스는 1 atm의 초기 압력에서는 소염 거리가 0.61 mm 이므로 본 연구에서 사용된 모든 연소기에서 화염의 전파가 발생했다. 하지만 당량비 1인 메탄과 공기의 예혼합 가스의 경우 소염거리는 1 atm에서 2.5 mm 이다. 따라서 높이가 1 mm와 2 mm의 연소기기의 경우는 화염을 전파하기 위해서는 초기 압력을 어느 정도 이상 상승시켜야 한다. 연소기의 지름이 화염의 전파를 위한 최소 압력에 미치는 영향은 연소기의 높이에 비해 미미하다. 메탄 공기 혼합 가스의 경우 연소기의 높이가 2 mm인 경우에 지름이 7.5 mm, 15 mm 에서 1.3 bar로 동일하였다. 이를 통해 연소기의 경우 연소기의 형상보다는 최소 스케일 자체가 연소 특성에 영향을 주는 것을 확인 할 수 있었다.

### 3. 결론

원통형 초소형 정적 연소기에 대한 실험을 수행하여서 연소기의 성능을 알아보았다. 여러 가지 조건에 대해 수행된 실험에서 연소기의 높이가 매우 작아서 소염 거리에 임박 하는 경우 열

손실의 영향이 매우 커서 열손실이 없는 경우에 비해서 연소기의 성능이 매우 떨어졌다. 조건에 따라 열손실의 영향 때문에 화염의 전파가 불가능한 경우가 있었다. 따라서 초기 압력을 높여가면서 화염의 전파가 가능한 조건 값들을 얻어내었다. 본 실험결과는 추후 초소형 연소기 제작시 성능과 스케일을 고려한 설계 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 CERC 의 연구비 협조로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. F. Carlos, <http://www.me.berkeley.edu/cpl>
2. A. Mehra, A.A. Ayon, I.A. Waitz, and M.A. Schmidt, "Microfabrication of high-temperature silicon devices using wafer bondig and deep reactive ion etching", *IEEE Journal of MEMS*, Vol.8, No.2, 1999, pp.152-160
3. D.H. Lee, D.E. Park, J.B. Yoon, S. Kwon and E. Yoon, "Fabrication and test of a MEMS combustor and reciprocating device", *Journal of Microengineering and Micromechanics*, Vol.12, 2002, pp.26-34
4. Lee, S.; Seo, Y. The Status of Micro Fuel Cell Research in Korea, *Proceeding of Power MEMS 2002, International Workshop on Power MEMS*, Tsukuba, Japan, 2002, pp.10-13
5. I.A. Waitz, G. Gauba and Y.-S Tzeng, "Combustors for micro-gas turbine engines", *Journal of Fluid Engineering*, VI.120, Issue 1, 1998
6. Lee, D.H.; Choi, K. H.; Kwon, S. Measurement and Modeling of Combustion in a Microcombustor, *AIAA 35th Thermophysics Conference 11-14 June 2001, Anaheim, California*, 2001