

소염 거리에 근접하는 소형 연소실 환경에서의 연소특성

이대훈*, 최권형*, 권세진**

Combustion Characteristics in Small Combustion Chamber Size about Quenching Distance

Dae-Hoon Lee*, Kwon-Hyoung Choi* and Sejin Kwon**

Key Words : Quenching , Small combustor, Micro combustion, MEMS.

Abstract

Combustion phenomenon in scale-downed combustor is investigated. As the combustor scale decreases surface to volume ratio increases and chamber size approaches quenching distance. As the combustor scales down surface to volume ratio increases resulting increased heat loss. And this heat loss can affect quenching and instability of the flame. To investigate this effect plastic mini combustor is made. Stoichiometrically premixed Hydrogen / air gas is used as fuel. Initial chamber pressure and chamber size are varied and the effects are evaluated. Peak pressure decreased with the decrease in chamber height. As initial chamber pressure decreases peak pressure decreases and this change is more important than scale down effect till the chamber height of 1mm. With this result and further information following the experiments design parameter for micro engine can be established.

1. 서 론

미세 가공 기술과 정밀 기계 기술의 발달과 함께 다양한 시스템들에 대해 축소화 정밀화 하는 기술이 개발되고 있다.[1] 이러한 기술 추세에 따라

MEMS 가공 기술의 발달과 함께 초정밀 미세 장치를 제작할 수 있는 가능성이 열리면서 스케일 다운된 다양한 시스템 개념들이 제안되게 되었다.[2] 초기 MEMS 기술은 정적 구조물에 해당하는 센서나 액추에이터를 제작하는 기술이 주를 이루었으나 기술의 발달과 함께 움직일 수 있는 시스템을 이러한 기술을 이용해 제작하려는 시도들이 시작되었다. 미세 비행체, 미세 로봇 등이

* KAIST 항공우주공학 대학원

** KAIST 항공우주공학

이러한 시스템의 대표적인 예이다. 이처럼 작동하는 장치의 전기적, 기계적 동력원을 제공하는 장치로는 배터리를 들 수 있다. 배터리는 실제 현재 상용화 된 동력원으로 소형, 경량화가 가능한 거의 유일한 대안이다. 하지만 배터리는 동적 시스템의 에너지원으로서 기계적 작동을 요하는 시스템의 경우 Table 1 에서 보는 바와 같이 낮은 에너지 밀도로 인하여 작동 시간과 활용 범위가 제한된다는 한계가 있다. [3].

Table. 1 Energy density

Device	Power density (MW/m ³)
Micro Lithium battery	0.4
Micro solar cell	1
Micro-elastic motor	1.7
Micro-reactor	20
Macro combustor	40
Micro channel reactor	150
Micro-combustor	2000

또한 배터리를 사용할 경우 폐전지의 처리 과정에서 환경 문제를 야기하는 치명적 한계를 지니고 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 대안으로 최근 Power MEMS 가 주목 받고 있다. Power MEMS 는 MEMS 가공기술을 이용해 제작된 미세화된 연소장치에 대한 개념이다.[4] 이는 화학반응을 통해서 얻을 수 있는 에너지의 밀도가 기존에 사용되는 배터리의 수천배에 달한다는 사실을 생각할 때 가공상의 어려움이나 제작상의 개발 난점에도 불구하고 Power MEMS 가 가지고 있는 매력적인 장점이다. 하지만 미세한 크기의 연소실을 제작할 경우 기존의 연소기에서는 고려하지 않았던 문제들이 발생하게 된다.

연소실에서 발생하는 열 발생량은 연료의 반응 양에 따라 증가하므로 체적에 비례하게 된다. 반면 연소실에서 발생하는 열 손실량은 벽면을 통한 열전달을 통해 발생하므로 연소기의 면적에 비례하게 된다. 따라서 연소기의 표면적-체적 비를 정의 할 때 연소실 크기가 작아질수록 길이 스케일에 비례해서 열 손실량이 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 표면적 체적 비가 매우 크지 않은 경우 연소기의 벽 간격은 소염 거리에 도달하게 된다. 연소실 벽면이 소염 거리에 도달하게 되면 증가된 열 전달량에 의해 화염이 유지될 수가 없으므로 연소기로서의 기능을 상실하게 된다. 기존의 연소기들은 소염거리에 비해 큰 스케일을 가지고 있으므로 연소현상에 대한 해석의 방법에서 연소 속도는 벽면 열 손실을 고려하지 않은 방법들을 사용해 왔다.[5] 하지만 벽면 열 손실의 증가로 인해 연소 속도의 변화 및 화염 전파 특성의 변화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 연소실 환경 변화에 따른 화염의 특성을 실험을 통해 관찰하였다.

2. 실험

표면적-체적 비를 증가 시키고 연소실 벽면 간격을 축소하기 위해 연소실 높이의 변화를 통해 체적 변화가 가능한 연소기를 제작하였다. 불꽃 점화 방식으로 점화를 시킬 경우 점화를 위한 전극이 연소실 내부에 설치되어야 하므로 전극을 설치하기 위해서는 전기적 절연이 중요한 문제가 된다. 전극 주변에 절연막을 만들 경우 반복된 연소의 과정에서 절연막의 파괴로 인해 전극에서 방전이 이루어지지 않는 문제가 발

생하게 되고 절연막으로 인해 연료 기밀을 얻기 어렵게 되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 연소기의 재질은 아세탈로 선택하였다. 연소 반응에 걸리는 시간이 짧기 때문에 열로 인한 문제는 고려하지 않아도 되고 아세탈은 기계적 성질이 좋아 형상이 변형에 강한 특성이 선택의 이유가 되었다. 연소실은 실린더 형태를 가지고 연소실 아래 만들어진 나사선을 통해 연소실 높이를 조절할 수 있도록 제작하여 연소실의 체적 변화를 얻을수 있게 하였다. 전극의 높이가 0.4mm 이므로 연소실 높이는 0.4mm 에서 5mm 까지 변화가 가능하다. 설계 제작된 연소기의 개략도는 Fig. 1 과 같다.

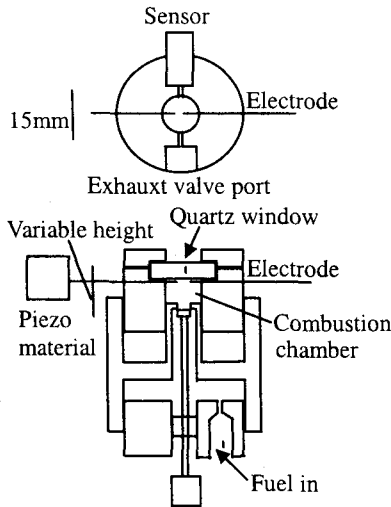


Fig. 1 Schematic of combustor

실험에 사용된 연료는 수소와 공기가 이론혼합비로 예혼합된 가스이다. 실험에 이용된 파라미터는 연소실의 높이와 연소실 초기 압력이다. 연소실 높이는 1mm 에서 4mm 로 변화시키면서 수행하였고 연소실 초기 압력은 10 psi 에서

40 psi 로 변화시키면서 수행하였다. 실험조건표는 Table 2 와 같다.

Table. 2 Test condition matrix

초기압력 (psi)	10	20	30	40
연소실 높이(mm)	1	2	3	
표면적/체적(cm)	22.7	12.7	9.3	

전체적인 실험장치의 구성은 아래 Fig. 2 와 같다. 수소와 공기의 예혼합 가스가 퍼지 탱크에 들어오고 밸브를 통해 연소기로 들어간다. 전극에서 방전을 통해 점화를 시키고 연소반응이 일어나면 반응 전후의 압력변화를 센서를 이용해서 측정했다.

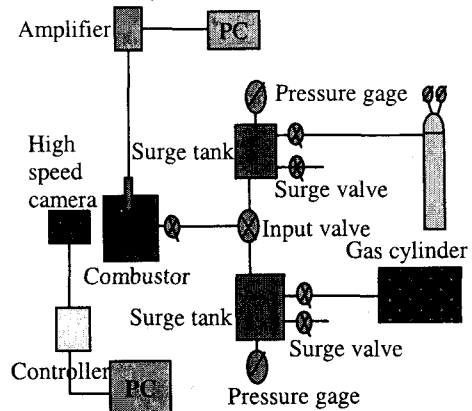


Fig. 2 Schematic of test apparatus

점화는 압전 물질 스위치로부터 발생하는 방전을 이용하였다. 점화 에너지를 측정하기 위해 점화선에 전압계 전류계를 연결하여 방전에 의한 전압 전류 값을 측정하였다. 점화 시스템의 구성과 방전 에너지 측정을 위한 장치의 구성은 Fig. 3 과 같다.

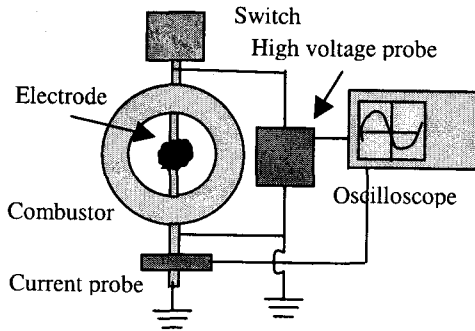


Fig. 3 Schematic of ignition system

3. 결과

연소반응으로 인한 연소실 내 압력변화의 대표적인 압력변화 곡선은 Fig. 4와 같은 형상을 가진다. 일반적인 연소기 압력 변화보다 압력상승과 강하가 급격해지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5의 결과는 0.35cc 크기를 가지는 연소실에서 연소실 초기압력 10psi 일 때의 연소를 전후한 압력 변화이고 Fig. 6의 결과는 425cc 의 연소실 크기에서 초기압력 11psi 일 때 연소를 전후한 연소실 압력변화의 결과이다. 연소실 크기의 급감으로 전체적인 반응시간이 100 배 정도 감소하고 최고 압력이 절반이상 감소한 것을 확인할 수 있다.

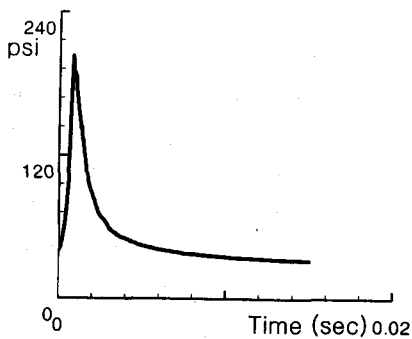


Fig. 4 Typical pressure history

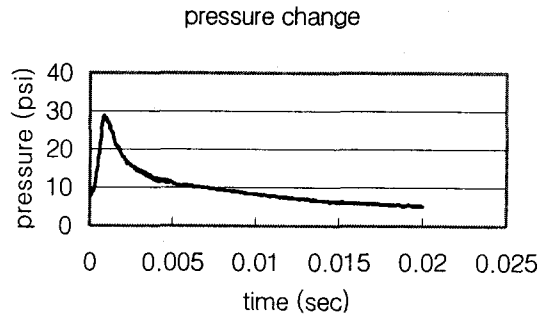


Fig. 5 Pressure change in 0.35cc combustor

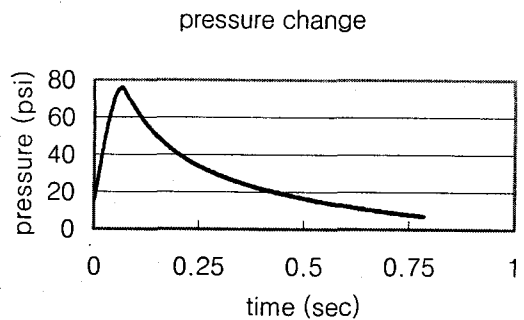


Fig. 6 Pressure change in 425cc combustor

증가된 열 손실량이 압력상승과 강하 특성에 큰 영향을 미치는 것을 볼 때 화염의 점화, 전파 특성에 영향을 미친다는 것을 확인할 수가 있다.

연소실에서의 연소반응에 의한 에너지 생성을 일로 전환하기 위해서는 연소반응에 소요되는 시간과 연소반응에 의한 연소실내 압력, 온도 등이 중요한 파라미터가 된다. 본 연구에서는 연소실 높이를 변화시키고 연소실 초기 압력을 변화시켜 가면서 연소반응에 의한 최고 압력과 최고 압력에 이르는 시간을 확인하였다. 연소실의 크기를 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 연소실 크기 변화에 대한 반응 압력의 최고 값 변화에 대한 결과는 Fig. 7 과 같다. 연소실 크기가 작아질수록 반응 영역이 줄어들고 이에 따라 최고압력의 크기가

줄어드는 것을 확인할 수 있다.

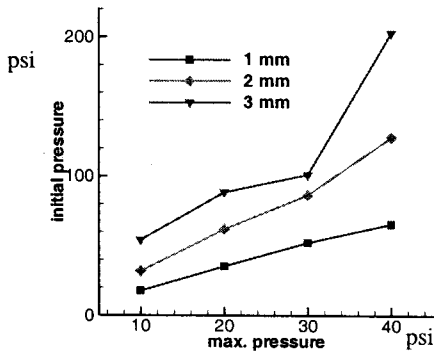


Fig. 7 Maximum pressure change by varying chamber size and initial pressure

연소 반응에 의한 전체적인 압력변화의 형상은 연소실 크기 2mm 일때의 결과인 Fig. 8 과 같다.

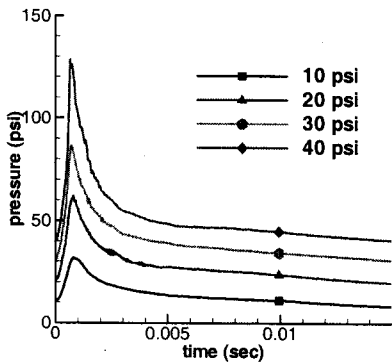


Fig. 8 Pressure change by reaction

Fig. 9 에서 보이는 바와 같이 각 실험 조건에 대해 점화 시점으로부터 최고 압력에 도달하는 시간은 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 최고 압력에 도달하는 시간의 초기 압력에 대한 변화는 연소기 크기가 커질수록 안정되어져 가는 것을 확인할 수 있다.

연소실 크기를 1mm 까지 변화시켜 가면서 수행한 실험에서 수소 공기 혼합 기체의 소염거리인 0.64mm 에 접근하는 1mm 높이의 연소실 환경에서

연소실 초기 압력대 최고 압력비는 대략 2 정도의 값을 가져 연소로 인한 압력 형성이 가능한 것으로 관찰되었다.

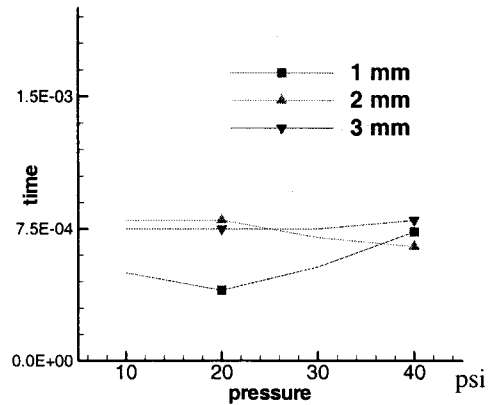


Fig. 9 Time to reach maximum pressure

측정된 압력 결과에서 경우에 따라 연소 후 압력 값이 초기값보다 작아지는 것을 발견할 수가 있는데 이것은 센서의 반응성에 의한 것으로 판단된다. 연속의 크기가 작아질수록 밀봉 문제가 커지는데 실험에 사용된 연소기의 경우 가압 테스트에서 압력저하나 기밀실패의 결과를 보이지 않았다.

연소기가 미세한 크기로 작아질 경우 연소기에서 생성되는 열에너지의 양이 작아진다. 따라서 연소기의 운용 가능성을 확인하기 위해서는 점화와 운용에 필요한 입력 에너지 값과의 비교가 필요하다. 실험에서 얻어진 압력 결과를 토대로 열역학 1 법칙을 이용한 정적 연소실 해석을 수행하였다. 연소실 내를 반응물과 생성물로 구분하고 열역학 변수들을 상수로 가정한 해석의 결과 1mm 크기 연소실에서 초기 압력에 따라 100~200mJ 의 열에너지 생산량이 계산되었다. 연소실 높이가 증가하면 생산량도 증가하여 3mm 높이에서는 3 J 이상의 값을 얻을 수 있다. 연소실내 연료의 총량이 가지는 heating value 와 실제 연소반응에서 얻어진 압력 결과로부터 계산된 열에너지 발생량을 비교하

는 효율의 경우 1mm 크기 연소실에서 연소실 초기 압력에 따라 0.1~0.2, 3mm 연소실 높이의 경우 압력에 따라 0.3~0.6 의 값을 보여준다. 작은 연소실의 경우 연소실 높이에 비해 상대적으로 긴 연소실 길이 스케일로 인해 화염의 발생이 전극 부근에서 국부적으로 발생하기 때문에 효율이 많이 낮아진 것으로 판단된다.

일반적으로 연료의 점화 에너지 값이 수 mJ 이라는 사실을 생각해 볼 때 미세 연소기는 점화 시스템의 최적화를 통해 미세한 스케일에서 사용가능한 충분한 일을 추출해 낼 수 있는 유용한 장치가 될 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

소형 연소기를 제작하여 연소기의 크기 축소에 따른 연소환경의 변화가 연소 반응에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 연소실 크기가 작아지면서 열 손실량이 증가하여 연소반응에 의해 증가한 연소실내 압력이 감소할 때 일반적인 연소기보다 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 연소기의 높이와 연소실 초기 압력을 변화시켜 가며 수행한 실험에서 연소실 초기 압력이 연소반응으로 인한 최고 압력에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며 연소실의 크기가 줄어들수록 최고 압력이 감소하는 것을 확인하였다. 소염거리에 해당하는 1mm 이하의 연소실 높이에 대해 추가적인 실험을 통해 마이크로 엔진을 제작하기 위한 설계 파라미터를 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) G. T. A. Kovacs, micromachined transducers, McGraw-Hill, 1998.
- (2) 이대훈, 권세진, 윤의식, "마이크로 엔진 개발 현황", 한국군사과학기술학회 추계 학술대회, 육군 사관학교, 2000.
- (3) Epstein, A. H. et al., "Power MEMS and Microengines", IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997.
- (4) K.Y.Kuo, Principles of Combustion, John Wiley, 1987.