

초소형 정적 연소실의 열손실 분석

나한비* · 이대훈* · 권세진*

ANALYSIS OF HEAT LOSS IN A CONSTANT VOLUME MICRO COMBUSTOR

HanBee Na, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon

ABSTRACT

A theoretical and experimental study on the combustion process in a constant volume micro combustor is described. Unlike in a macro scale constant volume combustor, the heat loss to the wall plays a major role in flame propagation in a micro combustor. In order to analyze the effect of heat loss on combustion phenomena, pressure transition from ignition was measured. A number of cylindrical micro combustors with different diameter and depth were used for experiment to study the effect of length scales and shape factor. The diameter of combustor ranged from 7.5mm to 22.5 mm and the height of cylinder was from 1mm to 4mm. Initial pressure was also varied for the experiment. The diagnostic methods were severely limited due to the size of the apparatus and uncertainties of certain quantities to be measured in a small-scale environment. An analytical method to derive physical quantities that are essential for performance prediction from the pressure measurements is described.

Key Words : Microcombustion, Heat loss, Closed vessel combustor, Flame Propagation

기 호 설 명

Q_l	Heat Loss	A_f	Flame Area
Q_p	Heat Production	m	Mole
V	Volume	R	Heating Value
H	Height of Combustor	h	Heat Loss Coefficient

1. 서 론

초소형 비행체 (MAV ; Micro Aerial Vehicle) 이나 초소형 인공위성과 같은 장치를 구동시키기 위해서는 전력원으로 현존하는 2차전지의 에너지 밀도보다 높은 장치가 필요하다. 화학에너지를 이용한 연소장치의 경우에는 에너지의 밀도가 매

우 높아서 위와 같은 장치의 전력원의 대안으로서 제시된다.

에너지 밀도가 높은 연소기를 초소형 이동 장치에 사용하기 위해서 많은 연구가 진행 중이다. 대표적으로 MIT에서는 Microturbine 엔진을 연구하고 있고[1], UC Berkely 에서는 Micro개쇄교 엔진을 연구 하고[2], KAIST에서는 Micro reciprocation Engine을 연구하고 있다. [3]

연소기의 크기를 수mm 단위로 줄이게 되면 열손실의 영향으로 인하여 전형적인 정적 연소기에서의 연소특성과 달라지게 된다. 표면적대 부피비가 매우 커지게 되므로 연소기의 벽면을 통

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

해서 빠져나가는 열손실이 매우 커지게 되고, 이것으로 인하여 열손실을 무시할 수 있는 경우와 비교할 때 연소특성이 달라지게 된다.

열손실이 연소 특성에 큰 영향을 미치는 연소기를 분석하기 위해서 실험적인 방법과 이론적인 방법을 동시에 수행을 하였다. 연소기의 크기가 변함으로서의 연소 특성을 알아보기 위해서 다양한 크기의 연소기를 제작을 하였고, 초기 압력의 영향을 알아보기 위해서 다양한 초기 압력으로 연소 실험을 하였다.

연소기의 크기가 매우 작기 때문에 얻을 수 있는 물리량이 매우 제한되어 있다. 본 연구에서는 시간에 따른 압력을 측정하였지만 좀 더 깊은 고찰을 위해서 에너지 보존 방정식을 기반으로 하여 해석 모델을 개발해서 연소기의 연소 특성을 예측하였다. 이것을 이용해서 연소기의 열손실 계수에 의한 연소 특성의 변화를 계산하였고, 소염현상등에 대한 예측을 하였다.

2. 연소 실험

2.1 실험장치

크기가 작은 연소기에서의 연소 특성을 알아보기 위해서 정적 형태의 초소형 연소기를 제작을 하였다. 연소기의 형태는 동전형 모양의 납작한 정적 연소기로서, 연소기의 위와 아래는 가시화를 위해서 유리로 되어 있다. Fig. 1 에서와 같이 연소기에는 5개의 구멍과 연결되어 있다. 첫 번째로는 연소 도중의 압력을 측정하기 위한 압력 센서 연결 부위과 있고, 2개는 점화를 위한 장치, 마지막 2개는 각각 연료 흡입구, 배출구를 위한 것이다.

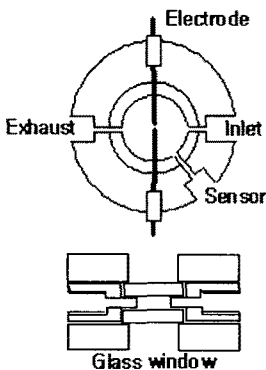


Fig. 1 Schematic of combustor

연소기의 높이와 지름이 연소 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 여러개의 연소기를 제작을

했다. Table 1 은 제작된 연소기의 지름과 높이를 나타낸 것이다. 연소기의 높이는 0.6mm에서 4.0mm 까지 제작을 했으며, 연소기의 지름은 7.5mm에서부터 22.5 mm 까지 다양한 연소기를 제작 하였다. 연소기의 부피는 0.044 부터 7.1 cm³ 까지 분포한다. 연소기에서의 열손실을 분석하기 위해서 가장 중요한 파라미터는 S/V 이다. 마이크로 연소기의 경우에는 보통의 정적 연소기 보다 S/V의 값이 매우 크다. 본 연구에서 사용된 연소기는 S/V가 74.1 에서 250 /m 까지 분포를 한다.

Table 1. Geometry of combustors

Aspect ratio	Diameter (mm)			
	7.5	15	22.5	
Height (mm)	1	7.500	15.000	22.500
	2	3.750	7.500	11.250
	3	2.500	5.000	7.500
	4	1.875	3.750	5.625

본 연구에서 사용된 연료는 수소와 공기가 당량비 1인 예혼합 가스이다. 점화는 스파크 점화 방식을 채택하였다. 압력의 변화는 연소기에 연결된 압력센서에 의해서 측정을 하였고 100kHz 샘플링으로 측정하였다.

2.2 실험결과

Fig. 3는 초기 압력이 1atm 일때에 S/V가 250/m 의 경우(지름 15mm, 높이 2mm)와 74.1/m 의 경우(지름 22.5mm, 높이 3mm)에 대해서 연소 후의 압력 증가를 나타낸 것이다. 두 실험장치의 경우에는 AR 값이 7.5로 동일한 실험 장치이다. Fig. 3에서와 같이 같이 S/V가 250/m 의 경우에는 최고 압력값이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이것은 연소기의 S/V가 74.1/m와 250/m 사이일 때 연소기의 성능이 급격히 떨어지는 점이 존재한 다는 것을 의미한다. MEMS 기술을 이용해서 연소기를 제작시에는 연소기의 높이에 제한이 있다. 연소 성능을 높이기 위해서는 연소기의 S/V값을 줄여야 하는데 이는 곧 연소기의 높이를 증가 시켜야 한다는 것을 의미한다. 하지만 높이가 커짐에 따르는 제작시의 어려움과, 소형 장치를 만들어야 하는 목적에 어긋남이 있을 수 있으므로 적절한 설계 기준이 있어야 한다.

Fig. 4는 연소 초기의 압력 1.5 atm(abs)로 증가할때에 연소중의 압력곡선을 나타낸 것이다. Fig. 5는 연소기의 초기 압력이 2.0atm(abs)일때의 결과 이다. 전반적인 경우는 연소기의 초기 압력이 1.0atm(abs)의 경우와 비슷했다. 연소기

의 초기 압력을 증가 시킴에도 열손실이 연소기의 성능에 미치는 영향이 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 연소기의 압력이 증가함으로써 burning velocity가 증가하고 따라서 연소 종료 시간이 감소함을 알 수 있다.

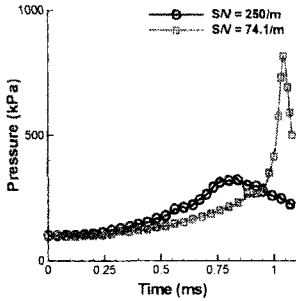


Fig. 3 Pressure Transition (1 atm)

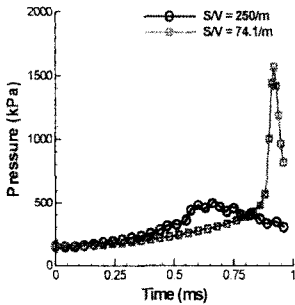


Fig. 4 Pressure Transition (1.5 atm)

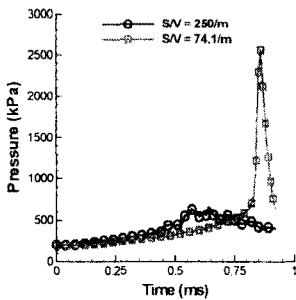


Fig. 5 Pressure Transition (2.0 atm)

3. 해석 모델

3.1 가정

초소형 연소기에서 화염이 전파해 나갈때에 고려 되는 주 열손실 원은 벽면을 전도를 통해 빠져나가는 열량이다. 정적연소기 해석에서 복사 열손실의 경우에는 거의 무시할 수 있다.[] 초소형 연소기의 경우에는 전도에 의해서 열손실이 발생하여서 연소기 내의 가스의 온도가 더 내려가므로 복사 열손실의 경우는 무시 할 수 있다.

정적 연소기의 경우에는 단위 질량의 연료가 반응을 하면 그 부분의 온도가 상승할 뿐 아니라 연소기 전체의 압력을 증가 시킨다. 열손실이

없는 경우에는 등엔트로피 가정을 사용하여서 압력 증가에 의한 연소기 내의 압축을 묘사 할 수 있다.

본 해석 모델에서는 열 손실이 수반 되는 경우를 묘사할 때에, 연소에 의한 압력 증가와 열손실에 의한 압력 하강을 순차적으로 계산을 하였다. 즉, 기존의 Takeno등의 정적 연소기 해석 모델에 열손실 모델을 삽입을 한 것이다.

다음은 이 해석 모델에 사용된 가정을 나타낸다.

- (1) 열손실이 없는 경우와 열손실이 있는 경우를 순차적으로 발생한다.
- (2) 단위 질량의 연료가 반응을 하면 연소기 내부의 압력이 증가하게 되어 압축의 과정을 거친다.
- (3) 압력전파는 화염의 전파보다 빠르기 때문에 연소기 내부의 압력은 동일하다고 볼 수 있다.
- (4) 기연영역는 frozen 가정을 사용했다.
- (5) 열손실은 기연영역에서 발생한다.
- (6) 열손실의 크기가 열생성량보다 크면 소염이 발생한다.

3.2 열손실 및 소염 모델

기연가스의 부분의 온도는 초기 연소기 온도에 비해서 1000K ~ 2000K 정도 높으나, 미연가스의 영역은 초기 온도에 비해서 100K ~ 200K 정도 높다. 따라서 벽면을 통해 빠져나가는 열손실은 기연가스영역에서만 발생한다고 가정해도 큰 오차가 없을 것이다. 식(1)는 위 가정을 사용한 열손실을 나타낸 것이다.

$$Q_l = 2 \frac{V}{H} nh (T_b - T_\infty) \quad (1)$$

화염이 전파해 나갈때에 따라 화학반응에 의해서 열이 생성되게 된다. 연소에 의한 열생성량은 다음과 같다.

$$Q_b = A_f \delta_L m_i \chi_{H_2} R_{H_2} \quad (2)$$

열생성량에 비해 열손실이 커지게 된다면 소염 현상이 발생하게 된다. 본 해석 모델에서는 각 단계에서 열생성량과 열손실량을 비교해서 소염 여부를 판단을 한다.

3.2 관계식

열 손실이 없는 정적 연소기 내의 연소 해석 과정은 연소반응으로 인한 압력 상승과 이에 의한 단열 압축, 그리고 부피 보존식을 동시에 풀이 나간다. Takeno 등은 에너지 보존 방정식을 기본으로 하여서 압력의 증가와 연료 소모를 나타내었다. [6]

무차원 압력 π 과 무차원 온도 θ 에 대해 본 해석 모델에 사용되는 식들은 다음과 같다.

$$\frac{d\pi}{dn} = \frac{(\beta \pi^{1/\gamma_u})\pi}{1/\gamma_b \pi^{1/\gamma_u} - (1/\gamma_b - 1/\gamma_u)(1-n)} \quad (3)$$

$$\theta_u = \pi^{(1-\gamma_u)/\gamma_u} \quad (4)$$

$$\theta_f = \left[\frac{m_i C_{p(u)}}{m_e C_{p(b)}} \theta_u + \frac{m_i}{m_e C_{p(b)}} T_i \chi_{H_2, R_{H_2}} \right] \quad (5)$$

$$\theta_b = \theta_f \left(\frac{\pi}{\pi_f} \right)^{(1-\gamma_b)/\gamma_b} \quad (6)$$

식 (3)은 무차원화된 압력식을 나타내고 식(4)는 미연가스 영역에서의 무차원화된 온도, 식(5)는 화염에서의 무차원화된 온도, 그리고 식(6)는 기연가스영역에서의 무차원화된 온도를 나타낸다.

식(3) ~ 식(6)을 풀어감과 동시에 각 단계에서 열손실과 소염현상 발생조건을 첨가를 해서 해석을 하면은 열손실이 수반되는 경우의 정적연소기를 묘사 할 수 있다. Fig.6는 본 해석 모델을 이용한 계산과정을 나타낸 것이다.

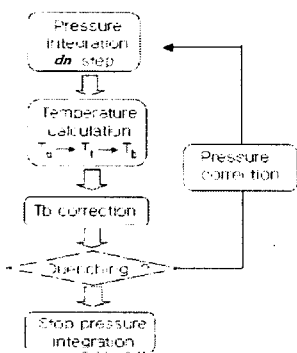


Fig. 6 Calculation Procedure

3.2.2 결과

Fig. 6는 벽면을 통한 열손실이 없을 경우에 연료의 소모율에 따르는 무차원화된 미연가스의 영역과 화염의 온도, 기연가스의 온도를 무차원화된 압력 곡선과 비교하고 있다. 보는 바와 같이 미연 압력의 증가에 의한 등엔트로피 압축에 의해서 미연가스와 기연 가스의 온도가 증가하게 된다.

Fig. 7는 열 손실이 없을 경우에 연료 소모율에 대한 온도의 분포를 나타내고 있다. 계단형으로 증가하는 형태를 띄고 있는데, 이것은 기연가스의 영역은 압력증가에 의한 압축이 누적되기 때문이다.

Fig. 8는 임의의 열손실 계수에 대한 압력 증가 곡선을 나타내고 있다. 열손실 계수가 커지면 커질수록 peak pressure의 크기가 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 이 그림은 열손실에 의

한 소염 현상을 고려하지 않는 것이다. 만약에 화염 전파 도중에 소염이 발생한다면, 이 그림에서 예측하는 peak pressure보다도 더 낮은 값을 기록하게 될 것이다.

Fig. 10는 본 해석 모델로 예측한 열손실 계수를 나타낸 것이다. 연소기의 높이가 낮으면 열손실 계수가 커지고, 동일한 연소기에 대해서 초기 압력이 커지면 열손실 계수가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 11는 소염현상을 예측한 것이다. 연소기의 높이가 낮으면 소염현상이 더 빨리 발생해서 연료를 조금만 반응을 시킨다. 연소기의 높이가 1mm 이하에서는 전체 연료의 50% 정도만 소모시킨다. 연소기의 높이가 증가하면 증가할수록 사용하는 연료의 분율이 커지게 된다. 초기 압력에 대한 영향이 사용된 연료 분율에 미치는 영향은 큰 편이 아니다.

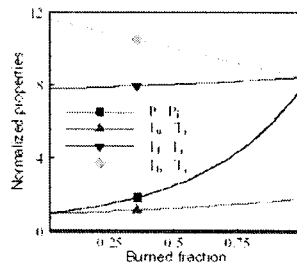


Fig. 7 Properties for adiabatic case

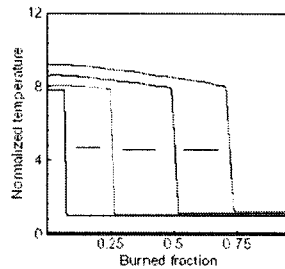


Fig. 8 Temperature Distribution for adiabatic case

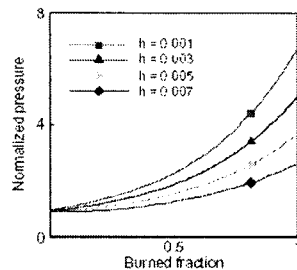


Fig. 9 Pressure Transtion for heat loss cases

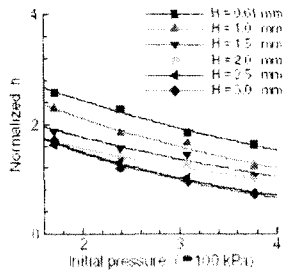


Fig. 10 Heat Loss Coefficient

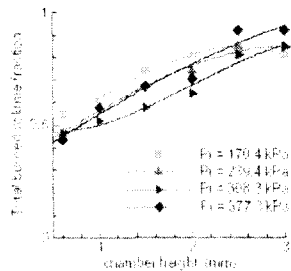


Fig. 11 Estimated Burnt mass fraction

4. 결론

MEMS 기술을 이용한 엔진을 제작시에 중요한 요소인 연소기에 대한 기초적인 연구를 수행하였다. 연소기의 크기가 일반적인 정적 연소기에 비해 매우 작기 때문에 S/V가 매우 크기 커서 연소기 벽면을 통해 빠져나가는 열손실이 매우 크다. 따라서 지금까지의 실험결과나 해석 모델을 사용하여 초소형 연소기를 해석하는데는 무리가 있다.

본 연구에서는 납작한 실린더 형태의 초소형 연소기를 제작하여 연소 실험을 수행하였다. S/V가 250/m의 경우와 74/m의 경우를 비교하건데, S/V가 250/m 부근에서 최고압력값이 매우 낮아져서 연소기의 성능이 매우 저하함을 알 수 있었다. 따라서 본 실험결과로 유추컨대, MEMS 기술로 연소기 제작시에 S/V가 250/m 정도가 된다면 연소 성능이 급격히 떨어짐을 예측할 수 있다.

또한 에너지 보존식을 기반으로 하는 해석 모델을 개발을 하여서 열손실이 없는 경우와 열손실이 있을 경우의 연소 특성을 비교하였다. 또한 본 해석 모델을 이용하여서 열손실이 있을 경우에 소염 현상이 발생하리라 예측을 하고, 소염 현상이 발생하기까지의 사용된 연료의 양을 예측을 하였다.

본 연구는 실험적 해석적 방법을 통해서 피스톤 형태의 초소형 엔진을 제작시에 초소형 정적 연소기 설계 파라미터를 제공을 하게 되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 연소공학 ERC의 재정지원으로 이루어졌으며, 관련자 제위께 사의를 표한다.

참고문헌

- [1] K Fu, et al. "Microscale Combustion Research for Applications to MEMS Rotary IC Engine", Proceedings of ASME 35th National Heat Transfer Conference, NHTC2001-20089
- [2] I Waitz, et al. "Combustor for Micro-Gas Turbine Engines", Journal of Fluids Engineering, Vol.120 pp. 109-117
- [3] D Lee, et al, "Measurement and Modeling of Combustion in a Microcombustor", AIAA 36th Thermophysics Conference, AIAA2001-3077
- [4] C. Rallis, A. Garforth "The Determination of Laminar Burning Velocity", Prog.Energy Combust.Sci.m, Vol.6, pp.303-329
- [5] D Lee and S. Kwon, "Heat transfer and quenching analysis of combustion in a micro combustion vessel", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol 12, 1-8, 2002
- [6] T. Takeno and T. Iijima "A theoretical Analysis of Flame Propagation in Closed Vessels", Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol.28, No.79