

과도한 열손실을 수반하는 초소형 정적연소실 내 화염전파

나한비* · 최권형** · 권세진***

Flame Propagation in a Micro Vessel under Excessive Heat Loss

HanBee Na, Kwon Hyoung Choi, Sejin Kwon

ABSTRACT

A numerical investigation on the flame propagation and extinction in a micro combustor is described. Previous measurements of H₂-air flame propagation in a submillimeter scale combustor exhibited significance of wall effects on burning velocity and extinction. The heat transfer to wall becomes important not only in the cooling of burnt gases but also during the flame propagation, which has been largely ignored in macro scale combustor calculations. In order to take the heat loss into account the combustion calculation, we developed a numerical code with a heat transfer model that was determined empirically from measured data. PISO algorithm was used for differencing of conservation equations. H₂-air reaction was modeled with 10 species - 18 steps. Comparison with measured data showed good agreement in flame propagation speed. Also the pressure decrease after flame extinction was accurately predicted by the model. A further study is desirable for a better quenching model that can predict the quenching location.

Key Words : Micro combustor, Closed vessel combustor, Heat loss, Flame propagation

기 호 설 명

k : Conductivity, W / mK
 κ : Surface area to volume ratio, m^{-1}
 α : Parameter for coordinate
 V_i : Diffusion velocity of i -th species

1. 서 론

MAV (micro aerial vehicle), 나노위성, 마이크로 로봇 등과 같이 기계적인 동작을 수행하는 독립 이동형 MEMS 장치의 동력원으로 주로 2차전지가 사용되어왔다. 그러나 이들 장치의 기계적 에너지 수요가 기존의 고정 MEMS의 에너지 수요

를 크게 상회하여, 2차전지의 에너지의 낮은 밀도는 독립 이동형 MEMS의 적용 범위에 큰 제약이 되고 있다. 이러한 배경으로부터 보다 높은 질량대비 에너지 밀도를 같은 초소형 동력원으로서 Micro Engine에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다[1]. Micro Engine은 액체 연료의 높은 질량대비 에너지 밀도를 활용하는 수단으로서 연소열의 형태로 방출된 연료의 화학 에너지를 기계적 또는 전기적으로 변환하게 된다. 일반적인 엔진의 초소형화를 위해서는 다양한 기술적 문제점이 해결이 선행되어야 한다. 예컨대 연소와 관련하여, 연소실을 포함하는 엔진 전체 크기의 축소는 전도 열전달의 영향을 크게 증대키

* KAIST 항공우주공학전공 대학원

** 현대자동차 남양연구소

*** KAIST 항공우주공학전공

† E-mail : melody@kaist.ac.kr

Tel : (042)869-3721 Fax : (042)869-3710

며, macro scale의 화염 모사에서 무시 가능했던 벽면으로의 전도/대류 열손실이 화염의 전파 속도 및 소화에 지대한 영향을 주게 된다. 그러나 기존의 연소 연구가 주로 macro scale의 실험 및 모델링에 기반을 둔 것으로 연소실의 스케일인 층류 화염 두께와 같은 스케일인 micro combustor 와 같은 조건에서 설계 및 연소 현상 예측에 이용할 수 있는 측정 데이터 및 모델링 수단이 나와 있지 않다.

한편 Lee et al.[2]는 초소형 정적 연소실의 제작을 바꾸어 가며 연소실험을 수행하며, 화염 전파에 의한 압력 곡선을 얻었고, 이로부터 연소 및 연소 종료후 연소가스의 열전달 특성, 소화 조건등을 유도하였다.

본 연구에서는 측정결과로부터 초소형 연소실의 열전달 계수를 경험적으로 산출하여, 이를 정적 연소실 내의 반응 유동장을 모사하는 보존 방정식에 생성항으로 삽입하여 스케일 축소에 따른 파한 열손실이 화염 전파 및 소화 그리고 연소 종료후 생성물의 분포에 미치는 영향을 모사하고 측정결과와의 비교를 통하여 검증하고자 한다

2. 이론 모델

2.1 지배 방정식

본 연구는 초소형 연소기 내에서 압력과 표면 적대 부피비가 변함에 따라 연소 특성의 변화를 이론적으로 모사하기 위해서 다음과 같이 문제를 정형화 했다. Fig. 1은 본 연구의 계산영역으로 납작한 실린더 형상의 연소실이다. 실린더의 높이 대 반경의 비를 조절하여 계산을 검증하는데 사용한 실험 조건을 맞추었다. 본 연구에서 사용한 연소실의 경우 반경에 비해 높이가 매우 작은 형태로서, 높이 방향의 구배가 존재 하지만, 계산의 단순화를 위하여 반경방향의 1차원 반응 유동장으로 가정하였다.

실린더 높이방향으로의 구배가 가장 큰 양은 온도로서 이는 열전달의 환산에 매우 큰 영향을 미치게 되지만, 본 연구에서는 열전달의 계산에 측정결과로부터 추출한 경험식을 사용하게 되므로 높이방향의 온도구배를 무시함으로 발생할 수 있는 열전달 환산의 난점을 보완하였다. Fig. 2는 화염이 전파하는 동안 실린더내의 가스로부터 벽면으로의 열전달을 기연/미연 영역으로 나누어 표시하였다. 이상의 단순화를 통하여, 연소실의 비점성 비점성 반응유동장에 대한 보존방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(r^a \rho u) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(r^a \rho u \cdot u) &= -\frac{\partial P}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{1}{r^a} \frac{\partial}{\partial r}(r^a \rho u \cdot e) &= -\frac{1}{r^a} \frac{\partial}{\partial r}(r^a q) - \frac{1}{r^a} \frac{\partial}{\partial r}(r^a \dot{m}) + \dot{q}_L \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{1}{r^a} \frac{\partial}{\partial r}(r^a \rho u \cdot Y_i) &= -\frac{1}{r^a} \frac{\partial}{\partial r}(r^a (\rho Y_i V_i)) + m_i \end{aligned} \tag{1}$$

는 다음과 같다. 위 식에서 원통형 좌표계에 대해서는 $a=1$ 이며, 에너지 방정식의 열전달 벡터 q 와 열손실항 q_L 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q &= -k \frac{\partial T}{\partial r} + \rho \sum_{i=1}^N h_i y_i V_i \\ q_L &= -h x_r (T - T_w) \end{aligned} \tag{2}$$

2.2 열 손실 모델

실제의 벽면으로의 열 손실은 연소실 내부 유동과 연소기 벽면과의 대류와, 연소기 벽면에서의 전도에 의해서 일어난다. 하지만 이러한 것을 모두 고려 하여 계산 한다고 하더라도, 높은 정확도를 기대할 수 없다. 따라서 Kodah et al.[4]의 모델링을 통해 고려하기로 하였다.

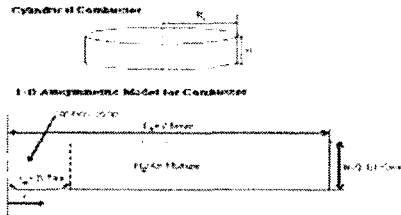


Fig. 1 Geometry of MicroCombustor

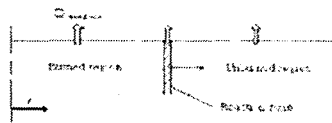


Fig. 2 Flame propagation with heat loss

벽면으로의 열 손실은 식 (1)의 에너지 보존 방정식의 생성항으로 고려하였다. 열 전달 계수는 일반적으로 유동과 온도 분포의 복잡한 함수 형태로 주어지나 최권형 등[3]이 본연구와 같은 형상의 연소실에서 상수의 열전달 계수를 사용하여도 비교적 정확한 결과를 얻을 수있음을 확인하였으며, 본 연구에서도 다음과 같이 이를 택하였다.

$$h = const. \quad (3)$$

따라서 에너지 보존 방정식에서 열생성항은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$q_c = -h \frac{2}{H} (T - T_w) \quad (4)$$

2.3 차분화

FVM(Finite Volume Method)를 이용하여 지배 방정식을 차분화 하였다. Upwind 혹은Hybrid Upwind/Central 차분화 방법을 통해 대류항-확산항을 차분화 하였다[5]. 화학종 보존 방정식에 대해서는 Hybrid Upwind/Central 차분화 방법을 사용하였고 운동량 보존 방정식과 에너지 보존 방정식은 Upwind Scheme을 이용하여 차분화하였다. 운동량 보존 방정식은 비 점성 유동을 가정하였고 에너지 보존 방정식은 열전달 벡터(Heat Flux Vector)에 의한 열 전달 항이 정압 비열이 일정하다고 가정할 때 확산항에 해당되지만 이러한 별도의 가정을 도입하지 않았으므로 일차원 General Transport 방정식으로 표현했을 때 확산항에 해당되는 항은 없기 때문이다. PISO를 이용하여 유동장을 풀게 될 때 연속 방정식과 운동량보존 방정식으로부터 압력 방정식을 유도하게 되므로, Staggered Grid를 사용하였다. 시간에 대해서는 내재적 오일러 스킴(Euler Implicit Scheme)을 사용하였다. 이러한 방법으로 지배 방정식을 차분화시킨 후 PISO를 이용해 수치 해를 구하였다[6, 7].

Fig 3은 Lee et al.[3]의 측정결과를 이용하여 최권형 등[4]의 방법으로 도출한 열전달 계수이다. 열전달 계수는 열손실 내의 초기 압력과 연

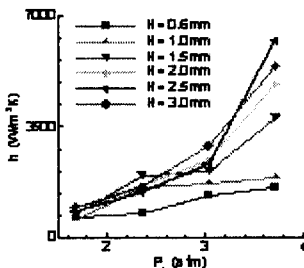


Fig. 3 Heat transfer coefficient

소실의 높이를 변수로 하여 표시하였으며 본 연구에서와 동일한 축대칭 연소실에서 얻어진 결과

로, 각 조건에서의 화염전파의 모사에 실제 이용된 값들이다.

3. 결과 및 토의

Fig 4.에서 보면, 실험에서는 약 0.5 msec에서 압력이 최대가 되었으나, 계산에 의해서는 2 msec에서 압력이 최대가 되었다. 이것은, 실험에서는 열 손실에 의해서 거의 대부분 현상이 발생하여서 화염이 끝까지 전파가 되지 않고 중간에 멈춘 다음에 식었기 때문에 이러한 차이가 발생한 것이다. 만약 소염 현상이 발생하지 않는다면 약 2.0 msec 일때 화염이 끝까지 전달 될 것이다. Fig. 5는 초기 압력 20psi 에 대해서 연소기 높이 1.0mm 에 대해서 열손실이 있을때와 없을때의 화염 전파 속도 변화를 나타낸다. 열손실이 없다면 약

1.5 msec에서 r=R 에 화염이 도달하나, 열손실이 있으면 화염의 전파 속도가 낮아져서 약 2.0 msec에서 r=R 에 화염이 도달하게 된다.

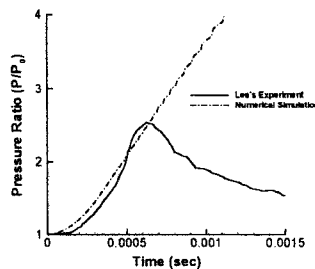


Fig. 4 Comparison of Pressure Rise

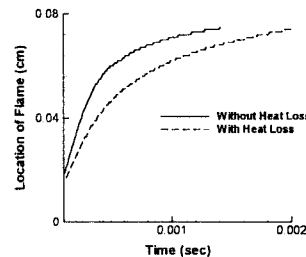


Fig. 5 Comparison of Flame velocity

벽면을 통한 열 손실이 있는 연소기의 경우에는 일반적인 연소기내의 온도 분포와 다른 형태를 가질 것이다. Fig. 6은 열손실이 있는 경우와 없는 경우에 대한 계산 결과를 비교한 것이다. 열 손실이 없는 (a)의 경우 화염면 안쪽의 가스

온도가 화염 존과에 따라 단열압축되어 더욱 높아지는 반면, 초소형 연소실의 경우와 같이 과도한 열손실이 존재할 경우 화염에 인접한 연소가스의 온도는 단열압축 효과로 인해 증대하지만, 연소실 중앙부의 온도는 화염이 멀어짐에 따라 급격히 감소한다 (b).

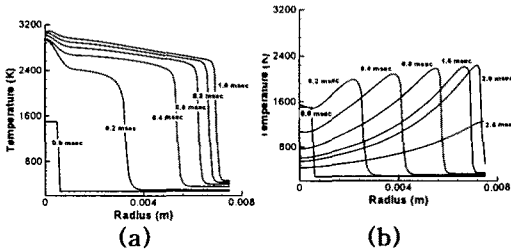


Fig. 6 Temperature Distribution

Fig.7은 열손실이 있는 경우와 없을 경우의 H₂의 분포의 변화를 보여 주고 있다. 열손실이 없을 경우(a)에는, 연소기의 중앙 부분의 온도가 높아서 역반응이 발생하지만, 열손실이 있는 경우(b)에는 중앙 부분의 온도가 상대적으로 낮아서 역반응이 일어나지 않음을 알 수 있다.

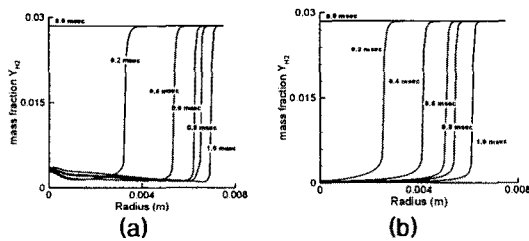


Fig. 7 Mass Fraction of H₂ Distribution

4. 결론

본 연구는 과도한 열손실을 수반하는 초소형 연소기 내에서의 화염 전파를 수치모사하여 실험 결과와 비교하였다. 계산은 열손실이 과도하면, 화염의 전파 속도가 느려지고, 연소기 내의 온도가 낮아지는 실험결과를 정확하게 예측하였. 한편 계산으로부터 얻어진 연소실 중앙의 온도분포와 화학종 분포는 과도한 열손실로 인하여 마이크로 스케일의 단열 화염의 경우와 다른 경향을 보이는 점이 관찰되었다. 화염대에서 생성되는 연소열에 버금가는 열손실로 인하여 연소실 중앙의 기연가스는 화염전파가 진행되는 1.5ms 안에 이미 1600K 이하로 냉각되어 기연가스 영역에 해

리에 의하여 생성되는 H 또는 OH 화학종이 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

실제 실험에서는 연소 반응에 의해서 발생한 에너지보다 벽면등으로 통해서 빠져나간 열 손실이 크기 때문에 소염 현상이 목격 되었다. 소염 현상의 발생 원인과 생성 시기에 대한 연구는 추후 더 보완되어야 할 과제이다.

소염 현상이 발생하기 전까지의 실험으로 얻을 수 없는 연소기 내에서의 에 대한 정보를 제공함으로써, 초소형 열장치의 성능 예측 및 제작방향에 유용하게 사용을 기대한다.

후 기

본 연구는 과학재단의 우수연구 센터인 CERC의 재정 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고문헌

[1] 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, NHTC2001-2008
 [2] Dae Hoon Lee, Kwon Hyoung Choi, Sejin Kwon, Measurement and Modeling of Combustion in a Microcombustor, 36th AIAA Thermophysics conference, AIAA2001-3077,2001.
 [3] 최권형, 권세진, 이대훈, 초소형 연소기에서의 열손실 모델링, 대한기계학회 논문집, 제출중, 2002.
 [4] Kodah, Z. H. and Soliman, H. S. and Qudais, M. A. and Jahmany, "Combustion in spark-ignition Engine," Applied Energy, Vol.66, 237-250, 2000.
 [5] Patanka, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid flow, Hemisphere publishing co. Iijima, T. and T. Takeno, "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity", Combustion and Flame, Vol. 65, 35-43, 1986.
 [6] Avelino, J. C. P., "Modeling one-dimensional laminar, reaction flows with an operator-splitting algorithm", Revista Mexicana De Fisica, Vol. 44, No. 2, 161-166, 1998
 [7] Issa, R. I., "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting", Journal of Computational physics, Vol. 62, 40-65, 1985.