

압력 변화 모사를 통한 초소형 연소기에서의 열손실 예측 모델 개발

최권형* · 권세진† · 이대훈**

(2002년 5월 13일 접수, 2002년 11월 8일 심사완료)

Development of Model for Heat Loss from a Micro Combustor Using Pressure Simulation

Kwon Hyoung Choi, Sejin. Kwon and Dad Hoon Lee

Key Words : Micro Combustor(미세 연소기), Closed Vessel Combustor(정적 연소실), Heat Loss (열손실), Flame Propagation(화염전파)

Abstract

As the size of a combustor decreases to a MEMS scale, heat loss increases and becomes a dominant effect on the performance of the devices. Existing models, however, are not adequate to predict the heat transfer and combustion processes in such small scales. In the present study, a semi-empirical model to calculate heat loss from a micro combustor is described. The model derives heat transfer coefficients that best fits the heat loss characteristics of a micro combustor that is represented by transient pressure record after combustion is completed. From conservation of energy equation applied to the burned gas inside the combustor, a relationship between pressure and heat transfer is reduced. Two models for heat transfer coefficients were tested; a constant and first order polynomial of temperature with its coefficients determined from fitting with measurements. The model was tested on a problem of cooling process of burnt gas in a micro combustor and comparison with measurements showed good agreements. The heat transfer coefficients were used for combustion calculation in a micro vessel. The results showed the dependence of flame speed on the scale of the chamber through enhanced heat loss.

기호설명

e : 내부에너지, $J/kg \cdot m^3$
 E : 활성화에너지, J/mol
 F : 플럭스 벡터
 h_i : i 화학종의 엔탈피, $J/kg \cdot m^3$
 h_i° : 생성엔탈피, $J/kg \cdot m^3$
 h : 열전달 계수, $W/m^2 \cdot K$

h_{M1} : 모델 1의 열전달 계수
 h_{M2} : 모델 2의 열전달 계수
 H : 연소기 높이, m
 k : 열전도도, $W/m \cdot K$
 M_i : i 화학종의 몰질량, $kg/kmol$
 p : 압력, Pa
 P : 연소기내 평균압력
 P_0 : 연소기 초기압력
 q : 열속벡터, W/m^2
 $q_{heat\ loss}^-$: 에너지 식에서의 열손실항, W/m^3
 r : 공간좌표, m
 R_0 : 연소기 반지름, m
 t : 시간, s

* 현대자동차 남양연구소

** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

† 책임저자, 회원, KAIST 기계공학과 항공우주공학 전공,

E-mail : melody@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3721, FAX : (042)869-3710

t_{Pmax}	: 최고압력시의 시간, s
T	: 온도, K
T_0	: 연소기 초기온도
u	: 속도, m/s
V_i	: i 화학종의 확산속도, m/s
Y_i	: i 화학종의 질량분율
α	: 좌표 파라미터
α_{M1}	: 열손실 모델 1의 파라미터
α_{M2}	: 열손실 모델 2의 파라미터
γ	: 비열비
κ	: 표면적대 부피비, m^{-1}
π	: 무차원화 된 압력
π_{Pmax}	: 무차원화 된 최고압력
π_{EXP}	: 무차원화된 압력 (압력)
ρ	: 밀도, kg/m^3
ρ_0	: 초기밀도, kg/m^3

1. 서론

MEMS 기술을 통해 동적 마이크로 스케일 시스템을 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 항공우주 분야의 마이크로 시스템으로는 MAV(Micro Air Vehicle), 초소형 인공위성 등을 들 수 있다. 이들은 기존의 초소형 기계장치와는 달리 독립 이동을 해야 하며 이러한 독립 이동이 가능한 마이크로 시스템을 구현하기 위하여 초소형 내연기관 엔진(Micro Internal Combustion Engine)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다⁽¹⁾.

초소형 내연 기관의 경우 높은 에너지 밀도를 갖는 탄화수소계 연료를 사용함으로써 초소형, 고출력이 이론적으로 가능하다. 현재 진행중인 초소형 내연 기관에 대한 연구는 Lee et al.⁽²⁾의 마이크로 왕복엔진과 Mehra et al.⁽³⁾의 가스터빈 엔진 그리고 Fu et al.⁽⁴⁾의 회전형 엔진(Rotary Engine) 등이 있다. 초소형 내연기관의 구현을 위해서는 여러 가지 선행되어야 할 기술적인 과제가 있다. 그 중의 하나가 초소형 연소실에서의 과도한 열손실에 의한 영향이다. 초소형 연소실의 경우 연소실의 크기가 크게 작아짐에 따라, 반비례하여 외부로의 열손실이 증가하며, 이는 엔진의 출력뿐 아니라 연소현상 자체에도 영향을 미치게 된다. 화염이 전파하는 동안의 과도한 열손실은 화염 전파속도를 저감시키거나 화염전파 과정중의 소화를 초래할 수

있다. 이는 초소형 내연기관의 구현에 있어서 해결 해야 할 가장 중요한 문제중의 하나이다. 한편 기존의 엔진 연구에서는 연소반응 과정중의 열손실을 무시하여 왔다. 이는 마크로 스케일의 연소실에서 화염전파 지속 시간이 매우 짧고, 벽면으로의 대류 및 전도 열손실이 연소반응을 통해 발생하는 열생성량에 비하여 매우 작기 때문이었다. 한편 초소형 연소실에서는 연소가스와 벽면의 온도차는 마크로 스케일에서와 별 차이가 없으나, 길이의 스케일이 대략 1/100 로 감소함에 따라 열손실이 연소 및 엔진의 성능에 미치는 영향을 무시하는 것이 불가능 하다.

Lee et al.⁽⁵⁾은 연소실의 체적 및 형상비(표면적/체적)의 변화가 가능한 초소형 연소기를 제작하고 초소형 연소실에서의 연소 현상에 대한 체계적인 측정을 시도하였다. 연소실은 실린더 형태를 가지며, 연소실의 바닥면의 높이를 조절하여 연소실 높이를 바꾸어 가며 실험할 수 있도록 제작하였다. 각 연소실 형상 조건에서(연소실 높이 0.61 mm ~ 3mm) 연료-공기 혼합 가스의 초기 압력을 1.68 atm ~ 3.72 atm 으로 바꾸어가며, 화염전파의 가시화와 연소실내부의 압력변화를 측정하였다.

초소형 연소실의 특성상 보다 다양한 계측이 불가능하였으며, 위의 측정으로부터 모델링에 필요한 계수들을 추출하는 것이 요구되었다. 이와 같은 연구를 수행하기 위해서는 추가적인 정보, 즉 온도 및 연소 속도 등이 필요하다. 그러나 실험적 제약에 의해 압력을 제외한 물리량들은 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이론 및 계산적 접근을 통해 실험 결과 비교 분석함으로써 표면적대 부피비 증가에 따른 열손실 효과가 연소 특성 및 연소 효율에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

본 연구에서는 단순한 열전달 메커니즘을 초소형 연소실에 적용하고, 그 결과를 압력 변화로 표시하였으며, 측정된 압력곡선과의 비교를 통하여 열전달계수를 추출하였다. 이렇게 얻어진 열전달 계수를 단순한 일차원 화염 전파 모델에 적용하여, 화염전파 속도가 예측한 바와 같이 열손실에 의하여 감소하는 것을 확인하였다.

2. 이론 모델

2.1 연소실내의 반응 유동장

본 연구에서는 정적 연소실에서 표면적 대 부피비가 커짐에 따라 일어나는 열손실의 증가와 이에 따른 연소 특성의 변화를 이론적으로

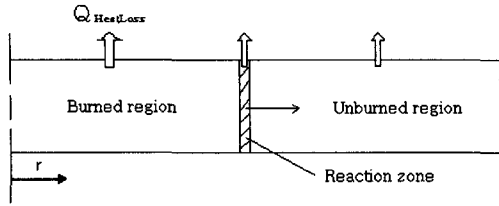


Fig. 1 One-dimensional flame propagation with heat loss

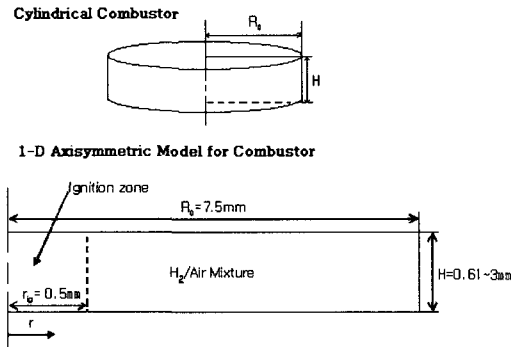


Fig. 2 Schematic of computational domain

모사하기 위하여 다음과 같이 문제를 정형화 하였다. 정적 연소실에서 화염은 일차원으로 전파한다. 이때 Fig. 1 과 같이 일반적인 일차원 화염 전파 문제에서는 다루지 않는 열 손실 효과를 고려한다.

연소실 벽면으로의 열 손실은 반응 영역(Reaction zone), 연소 가스 영역(Burned gas region), 미연 가스 영역의 전 영역에 걸쳐 일어난다. 이러한 열 손실의 영향은 에너지 보존 방정식에 생성 항으로 열손실을 추가함으로써 고려한다. Fig. 2 는 비교 검증하고자 하는 Lee et al.의 실린더 형의 축소형 연소기이다.

연소기 내부는 반경방향의 일차원 반응 유동장으로 가정한다. 원통형이므로 축대칭을 가정할 수 있고 지름에 대한 높이는 비는 0.081~0.4에 불과하므로 연소실의 높이 방향의 화염전파가 미치는 영향은 미미하므로 r방향 만의 일 차원 반응 유동장으로 가정할 수 있다. 본 연구에서 열 손실이 있는 일차원 반응 유동장을 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 이상기체 상태 방정식이 성립한다.
- (2) 비점성 유동으로 가정한다.
- (3) Dufour-Soret 효과(농도차에 의한 열전달과 온도차에 의한 물질 전달)는 무시한다.
- (4) 외력의 영향은 없다.

(5) 복사 열전달은 없다.

2.1.1 지배 방정식 및 경계 조건

비정상 비점성 유동장과 비정상 화학종 보존 방정식은 다음과 같다. 이때 α 는 좌표계를 의미한다. $\alpha=0$ 이면 직각 좌표계(Cartesian Coordinate), $\alpha=1$ 이면 원통형 좌표계(Cylindrical Coordinate), $\alpha=2$ 이면 구형 좌표계(Spherical Coordinate)이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u \cdot u) = -\frac{\partial p}{\partial r}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u \cdot e) = -\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}[r^\alpha q] - \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha u p) + \dot{q}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}(r^\alpha \rho u \cdot Y_i) = -\frac{1}{r^\alpha} \frac{\partial}{\partial r}[r^\alpha (\rho Y_i V_i)] + \dot{m}_i^* \quad (1)$$

에너지 보존 방정식의 열전달 벡터(Heat Flux Vector) q 와 열 손실항 \dot{q}_{loss} 는 다음과 같다.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial r} + \rho \sum_{i=1}^N h_i Y_i V_i$$

$$\dot{q}_{loss} = -h \kappa_r (T - T_w) \quad (2)$$

2.1.2 열 손실 모델

실제의 벽면으로의 열 손실은 연소실 내부의 유동과 연소실 내부 벽면과의 대류, 연소실 내부 벽면에서 외부 벽면으로의 전도를 거쳐 일어난다. 그러나 이러한 모든 복잡한 계산을 고려한다 하더라도 계산에 사용할 정확한 열 전달 계수를 알 수 없기 때문에 높은 정확도를 기대할 수 없다 열 전달 계수를 구하기 위해 Nusselt 수에 관한 실험식을 이용하지만 본 문제와는 다른 일반적인 정상유동에서 얻는 결과라 적용하기 힘들다. 또한 열 전달은 지배 방정식의 경계 조건으로 나타나므로 유동을 2 차원 혹은 3 차원으로 풀어야 하므로, 열 손실이 큰 연소실에서의 문제에 있어서 많은 계산 시간이 요구되면서도 높은 정확도를 기대하기 힘들기 때문에 열손실 효과를 Kodah et al.⁽⁶⁾의 모델링을 통해 고려하기로 하였다. 벽면으로의 열 손실 효과는 위의 식 (1)의 에너지 보존 방정식의 열 손실항으로 나타난다. 실험 결과로부터 직접 모델링할 것이기 때문에 열 전달 메커니즘은 식 (2)와 같이 간단한 대류 형태로 가정하였다. κ_r 은 단위 제어 체적당 연소실 벽면과 접하는 면적을 의미한다. 구형 화염

전파의 경우 연소가 종료되어 화염이 벽에 다다른 경우를 제외하곤 κ_r 은 0 이고 평면 혹은 원형 화염 전파의 경우 κ_r 은 $2/H$ 이다. 이때 H 는 연소실의 높이이며, T_w 는 연소실 벽면의 온도이다. h 는 열전달 계수로서 본 연구의 모델을 통하여 측정 데이터로부터 산출된다.

열전달 계수는 일반적으로 유동과 온도분포의 복잡한 함수형태로 주어지나 본 연구에서는 다음과 같이 두 가지의 형태를 가정하였다.

$$h_{M1} = \text{Const} \quad (3)$$

$$h_{M2} = a_h T, \quad \text{이때 } a_h = \text{const} \quad (4)$$

(3), (4)의 열전달계수에 의한 열손실항은 원통형 좌표계에서 각각 다음과 같다.

$$\dot{q}_{\text{loss}} = -h_{M1} \frac{2}{H} (T - T_w) \quad (5)$$

$$\dot{q}_{\text{loss}} = -h_{M2} \frac{2}{H} (T - T_w) = \frac{2}{H} a_h T (T - T_w) \quad (6)$$

이때 열전달 계수 h 는 Lee et al.의 실험으로부터 측정된 압력을 통해 구한다. 압력곡선은 압력이 올라가는 구간과 떨어지는 구간으로 나눌 수 있다. 올라가는 구간은 연소에 의한 생성에너지가 손실 에너지보다 큰 구간이고 떨어지는 구간은 연소가 종료된 후 열 손실만 있는 구간이다. 연소실의 표면적 대 부피비가 커질수록 열 손실 효과에 의해 압력이 급격히 떨어진다. 본 연구에서는 연소 유무에 관계 없이 열 손실 메커니즘은 동일하다고 가정한다. 열 손실 계수는 초기 압력과 연소실의 표면적 대 부피비만의 함수로 본다. 또한 압력이 떨어지는 시점 즉 압력이 최대가 되는 지점에서부터는 연소는 일어나지 않고 열 손실만 있다고 가정한다. 따라서 압력이 떨어지는 구간으로부터 구한 열 손실 계수를 통해 열 손실이 있을 때의 화염 전파를 모사할 수 있다. 이와 같은 가정을 통해 $h_{M1} = \text{Const}$ 일 때와 $h_{M2} = a_h T$ 두 가지 모델에 대해서 각각 다음의 수학적 해를 얻는다. 이때 π 는 무차원화된 압력으로서 P/P_0 이고 κ 는 연소실 전체에 대한 표면적/부피 비이다.

$$\alpha_{M1} = (\gamma - 1)\kappa \frac{T_0}{P_0} h_{M1}; \quad \alpha_{M2} = (\gamma - 1)\kappa \frac{T_0^2}{P_0} a_h \quad (7)$$

$$\pi_{M1} = (\pi_{P_{\max}} - 1) \exp^{-\alpha_{M1}(t-t_{P_{\max}})} + 1 \quad (8)$$

$$\frac{\pi_{M2} - 1}{\pi_{M2}} = \frac{\pi_{P_{\max}} - 1}{\pi_{P_{\max}}} \exp^{-\alpha_{M2}(t-t_{P_{\max}})} \quad (9)$$

모델링 된 압력과 실험의 압력 값의 차의 제곱의 합이 최소가 되도록 즉 다음 함수가 최소값을

갖도록 실험 결과와의 에러가 최소가 되도록 하는 α_{M1} , α_{M2} 값을 계산하여 h_{M1} 과 a_h 값을 얻는다. 이때 $(t_i, \pi_{Exp}(t_i))$ 는 실험에서 구한 시간 압력 곡선이다.

$$f(\alpha_M) = \sum_i \{ \pi_M(\alpha_M, t_i) - \pi_{Exp}(t_i) \}^2 \quad (10)$$

식 (8)-(9)의 수학적 해를 얻는 과정은 다음과 같다. 먼저 압력과 생성 에너지와 벽면으로의 열 손실 에너지와의 관계식을 유도한다. O' Rourke 와 Bracco 는 다음의 엔탈피에 대한 에너지 방정식으로부터, 단일 정적 연소실에서 압력 구배가 없을 때, 연소실 압력과 생성 에너지의 관계식을 다음과 같이 유도하였다.⁽⁷⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho u h) = \frac{dp}{dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}_{\text{loss}} \quad (11)$$

식 (11)를 연소실 전체에 대해 적분하고, 경계 조건에 대하여 Divergence theorem 을 적용한다. 정적 연소실은 Takeno⁽⁸⁾와 같이 압력 구배가 없다고 가정할 수 있으므로, 정압 비열이 일정하다고 가정하면 공간 좌표에 무관한 연소실 전체의 평균 압력 $P = P(t)$ 에 관한 다음의 식을 얻는다. 이때 γ 는 정압 비열 대 정적 비열의 비이다.

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \frac{\gamma - 1}{V} \int_V \dot{q}_{\text{loss}} dV \\ &= \frac{\gamma - 1}{V} \int_V (\dot{q}_{\text{loss}} + \dot{q}_x + \dot{q}_{\text{loss}}) dV \end{aligned} \quad (12)$$

다음의 열 생성항은 연소에 의한 에너지 생성항과 점화 에너지항 그리고 본 연구에서 고려한 벽면으로의 열 손실량으로 나누어 생각할 수 있다. 불꽃 점화에 의한 에너지 유입을 모델링 하기 위한 점화 에너지 항은 10~20ns 에 불과한 방전 시간이 지나면 0 이 된다. 또한 연소가 끝나면 화학 반응에 의한 열생성도 더 이상 일어나지 않으므로 식 (12)의 열생성항 가운데 외부로의 열 손실 항만 남게 된다. 연소가 종료 되면 연소실 전체는 연소 가스 영역으로서 온도가 균일 하다고 가정할 수 있다. 식 (5)-(6)을 식 (12)에 대입하고 이를 이용한다. κ 를 연소실의 표면적 대 부피 비로 정의하면 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{dP}{dt} = -(\gamma - 1)\kappa h (T - T_w) \quad (13)$$

이상기체 상태 방정식 이용하면 닫힌 계로서 밀도는 일정하고 연소 전후 기체 상수의 변화를 무시하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dP}{dt} = -(\gamma-1)kh\frac{T_0}{P_0}(P-P_0) \quad (14)$$

따라서 $h_{M1} = \text{Const}$ 일 때와 $h_{M2} = a_h T$ 때의 두 가지 열 손실 계수 모델을 식 (12)에 대입하고 정리하면 다음의 $\pi = P/P_0$ 에 대한 상 미분 방정식이 된다.

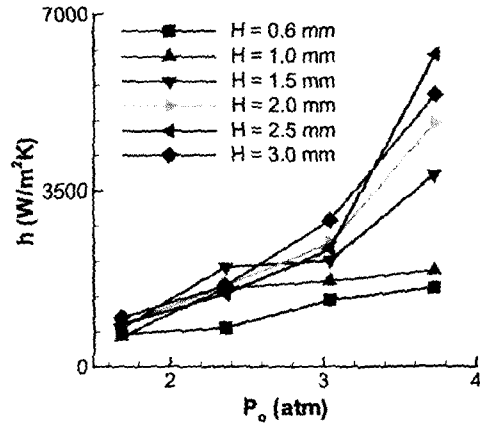
$$\begin{aligned} \frac{d\pi_{M1}}{dt} &= -\alpha_{M1}(\pi_{M1}-1) \\ \frac{d\pi_{M2}}{dt} &= -\alpha_{M2}\pi_{M2}(\pi_{M2}-1) \end{aligned} \quad (15)$$

식 (13)에 대하여 압력이 최대가 되는 지점 즉 ($t_{p_{\max}}, \pi_{p_{\max}}$)를 초기 조건으로 하여 적분하면 식 (8)-(9)의 수학적 해를 얻는다.

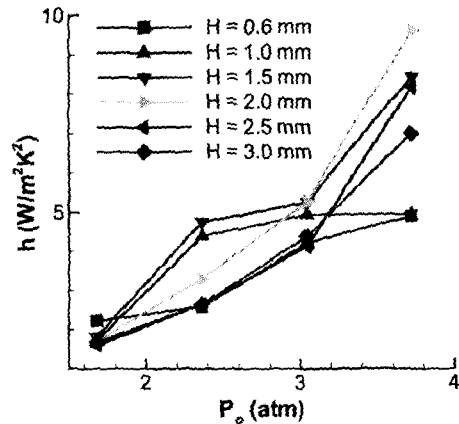
3. 결과 및 토의

3.1 열 손실 모델

Lee et al⁽⁵⁾은 연소실 높이를 변화시킬 수 있는 최소형 연소기를 제작 실험하였다. 초기 압력은 1.68atm~3.72atm 까지 연소실 높이는 0.6mm~3mm 까지 변화시켜 가면서 시간에 대한 압력의 변화를 측정하였다. 실험 결과로부터 얻은 열 손실계수를 연소초기 압력의 함수로 Fig. 3 에 표시하였다. 일반적으로 압력이 증가함에 따라 열손실 계수가 증가하였으며, 곡선의 기울기 역시 압력에 따라 비례하는 경향을 보였다. 이는 열 손실량이 압력의 함수임을 보여주고 있다. 초기 압력에 따라 같은 용적의 연소실 내의 연료-공기 혼합가스의 질량이 달라지기 때문이다. Kodah et al⁽⁶⁾의 경우 일반적인 크기의 연소기의 열 손실량을 모델링 하기 위해 열 손실 계수를 압력의 함수로 보았다. 이러한 압력의 영향은 연소실의 높이가 줄어들수록 현저히 감소한다. 연소실의 높이가 0.6mm 에 다다랐을 경우 열손실 모델 1 의 열 손실계수는 거의 차이가 없다. 연소실 높이 0.6mm 는 본 연구의 수소-공기 예혼합 화염의 소염 한계에 해당하는 길이이다. 반면 열손실 모델 2 에 있어서는 한계 연소실 높이에서도 계수가 변하는 Fig. 3(b)에 나타나고 있다. 위와 같은 방법으로 Lee et al 의 모든 실험 조건에 대하여 열손실 계수를 계산할 수 있었다. Figure 4 는 이대훈 등⁽⁹⁾ 이 같은 실험 결과에 대해 소염을 예측하기 위해 에너지 밸런스 식을 이용해서 구한 소형 연소기에서의 열손실 모델



(a) Heat loss model 1



(b) Heat loss model 2

Fig. 3 Heat transfer coefficient as a function of initial pressure

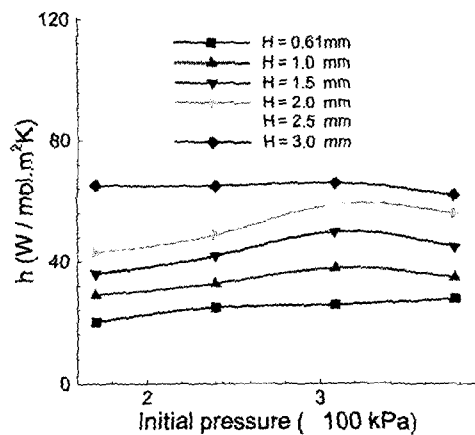


Fig. 4 Heat transfer coefficient by Lee et al.

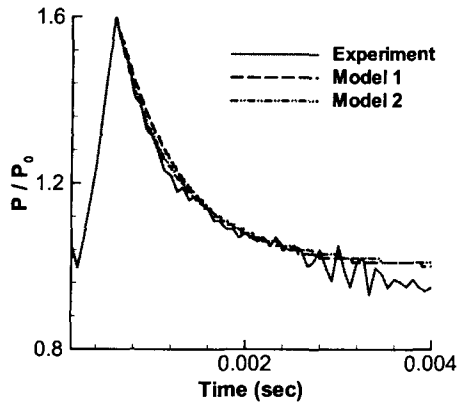


Fig. 5 Modeling of heat loss for $P_0=20\text{psi}$, $H=1.0\text{mm}$

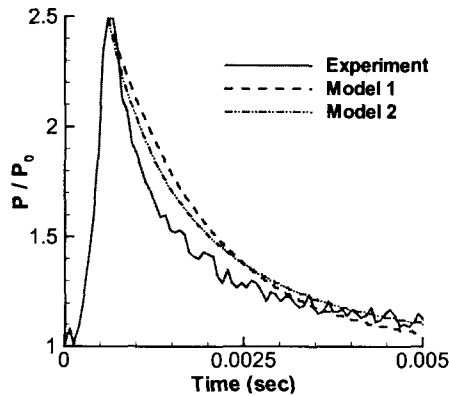


Fig. 6 Modeling of heat loss for $P_0=20\text{psi}$, $H=2.0\text{mm}$

의 값이다. 열손실 계수가 초기 압력 값에 큰 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 이대훈 등에 의한 소염 예측모델에서의 압력 변화는 소염 후 압력 강하를 기준으로 만들어진 본 논문에서의 모델과는 달리 소염이 발생하기 전 화염전파시의 열손실도 동시에 고려하여 하나의 식으로 표현하도록 만들어 졌으므로 기연영역의 열손실량을 실제보다 작게 예측하게 되기 때문이다.

이렇게 유도한 열손실 계수들을 실제 열전달 모사에 적용하여, 실험과 비교한 결과를 Fig. 5, 6에 도시하였다. 초기 조건은 실험 결과로부터 얻은 최대 압력을 주었다. 이때 연소실내의 조건은 연소종료 시점으로 하였고 따라서 온도와 압력 구배는 무시하였다. 즉 에너지 방정식의 열 손실 항만을 주고 압력이 열전달에 의하여 예측한 대로 감소하는지 확인함으로써 수치해석 코드와 열손실 모델을 검증한 것이다. 열손실 모델 1, 2 모두 연소종료 이후의 급격한 압력 저하를 잘 예측하였으며, 이로써 본 연구에서 제안한 열손실 모델이 측

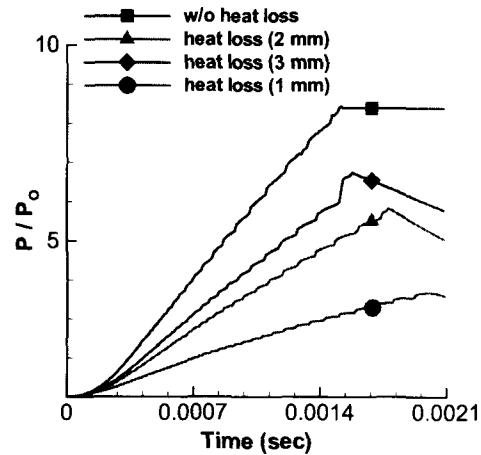


Fig. 7 Pressure rise due to flame propagation

정 데이터가 매우 제한된 초소형 연소실의 반응 유동장 해석에 효과적임을 간접적으로 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 열손실 모델을 화염전파 모델에 적용하여, 열손실이 초소형 연소실내의 연소 현상에 미치는 영향을 조사하였다.

3.2 표면적 대 부피비 증가에 따른 연소 및 열손실 특성

연소모델은 식 (1)을 따르며, 에너지 방정식의 열손실 생성항에 본 연구의 결과로 얻어진 열전달 모델을 사용하였다. 연소실 높이를 1~3mm로 변화시키며 수행한 계산 결과를 열손실이 없는 경우와 함께 Fig. 7에 도시하였다. 열 손실이 없을 경우 초기 압력의 9 배 정도의 압력을 얻을 수 있지만 연소실의 높이가 감소함에 따라, 즉 연소실의 표면적 대 부피비가 감소함에 따라 얻을 수 있는 최대 압력은 3.5 까지 감소한다. 이때의 압력은 벽면에서의 소염 현상이 없을 때 얻을 수 있는 최대 압력이다. 또한 최대 압력에 다다른데 걸리는 시간이 화염이 끝까지 전파되는데 걸리는 시간과 동일할때 표면적 대 부피비가 증가함에 따라 늘어나고 있다. 즉 압력 및 온도의 감소로 연소 속도가 감소한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 열 손실이 매우 큰 초소형 연소기에서의 연소 및 열손실 현상을 해석하기 위하여 초소형 정적연소실의 압력 측정 데이터로부터 열전달 계수를 추출하는 모델을

개발 하였으며, 이렇게 환산한 열전달 계수를 연소실 냉각 과정에 적용하여 실험값과 비교함으로써, 모델의 타당성을 검증하였다. 또한, 본 연구로부터 얻어진 열손실 모델을 화염전파 과정에 적용하여, 열손실이 과도한 최소형 연소실에 있어서 화염전파 속도가 연소실의 크기에 열손실을 통하여 크게 변화함을 확인하였다. 본 연구의 결과는 최소형 연소실 및 최소형 열장치의 성능 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 모델의 신뢰성을 위하여, 보다 정밀한 측정과 모델 자체에 대한 보완이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학재단의 우수 연구센터인 연소 기술 ERC의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 제위께 감사사를 드린다.

참고문헌

(1) Lee, D. H., Kwon, S., Yoon, E., 2000, "Research Trend in Micro Engine Development," *Proc. Korea Institute of Military Science and Technology Fall Conference*, pp. 331~336.
 (2) Lee, D. H., Park, D. E., Yoon, J. B., Kwon, S. and Yoon, E., 2002, "Fabrication and Test of a MEMS Combustor and Reciprocating Device," *J. Micromech. Microeng.*, 12, 26~34.

(3) Mehra A., Ayon A. A., Waitz I. A. and Schmidt M. A., 1999, "Microfabrication of High-Temperature Silicon Devices Using Wafer Bonding and Deep Reactive Ion Etching," *IEEE Journal of MEMS*, Vol. 8, No. 2, 152~160.
 (4) 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.
 (5) Lee, D.H. and Choi, K. H. and Kwon, S., "Measurement and Modeling of Combustion in a Microcombustor," *ALAA 36th Thermophysics Conference 11-14 June 2001, Anaheim, California*.
 (6) Kodah, Z. H. and Soliman, H. S. and Qudais, M. A. and Jahmany, Z.A., 2000, "Combustion in Spark-Ignition Engine," *Applied Energy*, Vol. 66, 237~250.
 (7) O' Rourke, P. J. and Bracco, F. V., 1979, "Two Scaling Transformations for the Numerical Computation of Multidimensional Unsteady Laminar Flames," *Journal of Computational Physics*, Vol. 33, 185~203.
 (8) Takeno, T. and Iijima T., 1985, "A Theoretical Analysis of Flame Propagation in Closed Vessels", *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 28, No. 79.
 (9) Lee, D. H., Kwon, Sejin, 2002, "Thermodynamic Modeling of Heat Loss and Quenching in a Down Scaled Combustor," *Transaction of the KSME, B*, Vol. 26, No. 7, pp. 919~926.