

## 정적 연소실에서의 열 손실 해석 모델

이대훈\* · 권세진\*\*

### Analysis of Heat Loss Effect of Combustion in Closed Vessel

Dae Hoon Lee and Sejin Kwon

#### ABSTRACT

Interests and importance of down-scale combustor is increasing with the emerging need for miniaturized power source which is now a bottleneck of micro system development. But in down scaled combustor increased heat loss compared to thermal energy generation inhibits the usability and application of the device, so as a preliminary work of down scaled combustor fabrication. Modeling tool for the device should be established. in this study modeling approach of closed vessel combustion phenomena that can express heat loss effect and resulting quenching is proposed and the result is compared with experiment data. From this model heat loss effect following combustor scale down can be further understood. and further more design parameter and analysis tool can be obtained.

**Key Words** : 정적연소실(Closed vessel), 열손실(Heat loss), 소염(Quenching), 해석모델(Analysis model)

#### 기 호 설 명

A	면적	j	기연영역 임의의 위치
C <sub>p</sub>	정압비열	u	미연영역
C <sub>v</sub>	정적비열	∞	연소기 외부
F	상수		위첨자
H	연소실 높이	~	수정값
h	열손실 계수	*	대표값
$\dot{h}$	연소열		그리스문자
m	몰수	$\beta$	기연영역 화염면 온도비
n	연소 체적 분율	$\delta$	두께
P	압력	$\gamma$	비열비
T	온도	$\theta$	무차원화 된 온도 ( $\frac{\text{온도}}{\text{초기온도}}$ )
V	연소실 체적	$\pi$	무차원화 된 압력 ( $\frac{\text{압력}}{\text{초기압력}}$ )
아래첨자		x	물분율
b	기연영역		
e	연소종료		
f	화염면		
i	연소초기		

\* KAIST 항공우주공학 대학원

\*\* KAIST 항공우주공학

## 1. 서론

미세 가공 기술과 미세 시스템 기술의 발달은 다양한 형태의 소형화, 미세 된 시스템을 개발할 수 있는 가능성을 열게 하였다.[1] 이러한 추세 속에 소형, 미세화 된 시스템의 동력원에 대한 요구가 발생하게 되었는데 기존의 배터리가 가지고 있는 중량, 환경, 재충전 문제 등을 대체 할 수 있는 동력원으로 최근 미세한 크기의 연소기가 주목받고 있다.[2] 일반적으로 미세한 시스템 개발과정에서 기존의 매크로 시스템에서는 고려되지 않았던 표면장력과 같은 다양한 문제점들이 발견된다. 이와 같이 연소기 또한 형상 축소되면서 새롭게 고려해야 할 난점들이 발생한다. 이 중 가장 큰 난점은 크기 스케일의 축소와 함께 발생하는 열손실의 증가이다. 연소실 표면적 대 체적 비는 길이에 반비례하므로 길이 스케일이 작아지면 열손실을 무시할 수 없게 된다. 실제 수 밀리미터 혹은 밀리미터 이하의 길이 스케일을 가지는 연소기에서는 증가된 열손실로 인해 화염으로 인한 압력상승이 저하되고 화염의 소멸이 발생하게 되어 연소기 성능이 급속히 저하되게 된다.[3] 미세한 크기의 연소기를 개발하기 위해서는 이러한 열손실이 있는 환경에서 화염의 거동을 효과적으로 모사할 수 있는 모델의 수립이 필요하다.

기존의 관련 연구의 경우 연소 모델을 만들어서 연소기를 해석 하는 경우 열손실을 무시한 연구들이 수행되어져 왔고[4] 열손실은 직접 수치 모사 방법을 사용해서 해석한 여러 연구들이 수행되어져 왔다. 본 논문에서는 단순한 모델을 통해 형상 축소된 연소실에서의 연소 현상과 비교를 통해 열손실과 소멸을 평가하고 해석할 수 있는 방법을 제시한다.

## 2. 해석 모델 개발

### 2.1 현상

정적 연소실의 경우 연료의 연소에 의해 발생한 열 에너지는 열손실로 잃는 에너지와 기연 영역과 미연 영역을 압축하는 에너지로 사용된다. 기존의 연소기 크기는 연소기에서 생산해 내는 열에너지의 크기가 연소실 벽면을 통해 손실되는 에너지의 양보다 월등히 크기 때문에 연소기의 성능 해석 시 열 손실을 고려하지 않아도 되었다. 열손실을 고려하지 않는 해석 방법에서는 기연 영역과 미연영역이 화염의 진행과 함께 단일 압축을 받는 것으로 해석하였다.[5] 하지만 연소기 크기가 작아져서 소멸거리에 근접하게 되면 열에너지의 생산량과 손실량의 차이가 점점 작아지게 되므로 해석 모델에 이를 고려해야 한다.

연소현상과 열에너지 생산은 화염면에서 발생하고 열손실은 연소기 전체면적에 걸쳐서 발생한다. 이 경우 화염의 진행에 따른 화염 부근 위치의 부분체적과 열손실이 발생하는 전체 체적을 계산 가능한 하나의 지배 방정식안에 넣어 미분 방정식이나 적분 방정식의 형태로 표현하는 것은 불가능하다. 따라서 열에너지 생산과 열 손실을 분리할 수 있는 지배 방정식을 수립하는 방법을 제안하였다.

### 2.2 가정

본 연구에서는 열손실을 고려하는 정적 연소실을 해석하기 위해 열손실을 고려하지 않는 기존의 정적 연소실 모델을 개선하여 열손실을 모델에 포함시켜 열손실에 의한 화염의 소멸을 해석할 수 있는 모델을 제안하였다. 모델에 사용된 가정은 크게 다음과 같다.

- 1). 연소기 내에서 화염이 진행할 때 연소현상과 벽면 열전달은 독립적으로 반복되어져서 발생한다.
- 2). 연소현상시 기연 영역과 미연 영역은 단일압축과정을 거친다.
- 3). 열전달은 기연 영역에서 발생하며 열전달시 유동은 비연소 유동상태이다.
- 4). 기연영역은 화염이 전파되는 단계마다 frozen isentropic 과정을 가진다.
- 5). 화염 전파 속도보다 압력 전파 속도가 훨씬 빠르다. (연소실내 압력은 평준화 된다)
- 6). 기연 영역과 미연 영역의 정적 및 정압 비열 등 열역학 계수는 각각 일정하다.
- 7). 기체는 이상기체 방정식을 따른다.

사용된 연료는 실험과의 비교를 위해 당량비 1의 수소-공기 예혼합 가스로 정하였다.

### 2.3 지배방정식과 열손실 모델

연소실내는 기연가스와 미연가스의 이중 기체가 존재하고 기연, 미연 각 영역은 단일압축과정에 의해 아래 관계식으로 표현할 수 있다.

$$F_u = P^{(1-\nu_u)/\nu_u} RT_u = P_i^{(1-\nu_u)/\nu_u} RT_i \quad (1)$$

$$F_b = \frac{m_e}{m_i} P^{(1-\nu_b)/\nu_b} RT_{bp} \quad (2)$$

$T_{bp}$  압축된 기연영역 온도

연소실 전체 체적 보존은 (3)식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{m_i RT_i}{P_i} = \left(\frac{R}{P}\right) \left[ m_e \int_0^n T_{bp} dn + m_i T_u (1-n) \right] \quad (3)$$

화염면의 온도는 아래 식(4)와 같이 미연영역의 온도와 연료의 연소열에 의해 결정된다.

$$m_e C_{p(b)} T_f^* = m_i C_{p(u)} T_u + m_i x_{H_2} \bar{h}_{H_2}^0 \quad (4)$$

이렇게 구해진 화염면의 온도로부터 단일압축식에 의해 기연 영역의 온도를 구할 수 있다.

연소실내 열손실은 대부분 벽면 열전도에 의해 발생한다. 모델에서 전도로 인한 열손실을 표현하기 위해서는 열경계층의 두께에 대한 정보와 열전도도에 대한 정보가 필요하기 때문에 이를 포함한 계수를 정의해서 대류항의 형태로 표현한 모델을 제시하였다. 전체적인 열손실은 벽면으로의 열손실과 미연 영역으로의 열손실의 합으로 구성된다. 미연 영역으로의 열손실을 구하기 위해 화염두께가 필요한데 층류 화염 두께 값을 사용하였다. 이를 통해 벽면 열손실을 벽면 특성 등을 포함하는 표현인 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{LOSS} = \frac{2V}{H} nh [T_b^* - T_\infty] \quad (5)$$

열전도는 연소기 상하면에서 발생하고 연소기 높이대 직경방향 길이비가 3에서 19에 이르기 때문에 구형화염 전파가 아니라 일차원적 전파의 형태로 가정하였다.

연소가 진행되면서 기연 영역의 온도는 화염의 전파와 함께 각 시간의 화염온도와 frozen isentropic 관계로부터 구해질 수 있다.[6] 이러한 관계에서 기연영역의 온도는 위치의 함수가 되는데 이는 그 위치에서 각 시점의 압력과 화염이 그 위치를 지날 때의 압력에 의해 결정된다. 연소반응과 압축에 의해 상승된 기연 영역의 온도는 열손실 식을 통해 수정되어 지고 이 수정되어진 온도로부터 연소기 내의 압력 값이 수정되어진다. 화염이 진행하면서 이 과정이 반복되어지면서 수행되어지게 된다. 이 때 연소로 발생하는 열에너지가 열손실량 보다 작아지면 소염이 발생한다. 소염 조건은 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$A \geq B$  일때는소염

$$A \equiv \int_b 2n(T_b - T_\infty) \frac{h}{H} dV + A_f \frac{T_b - T_\infty}{\delta_f} \quad (6)$$

$$B \equiv dnm_i x_{H_2} \bar{h}_{H_2}^0$$

## 2.4 계산 과정

위의 지배방정식과 열손실 모델을 이용해 무차원화 된 변수들에 대해 관계식을 만든다. 각 식들을 압력과 온도에 대해 초기 값을 나눈 값으로 무차원화 한 후 식(3)을 미분하고 식(1), 식(2)를 대입한다. 이 과정에서 단순한 형태의 상미분 방정식을 만들기 위해 기연 영역과 미연 영역의 비열은 각각 온도 2500K, 300K 일때의 값으로 고정하였다. 이렇게 만들어진 식에 이상기체 방정식을 사용하면 무차원화 된 압력과 연소 영역 분율과의 상미분 방정식을 얻을 수 있다. 미연 영역은 단일 압축 식을 이용해 단순한 온도 압력 관계식을 수립할 수 있다. 전체적인 과정과 과정에 사용되는 식은 다음과 같다.

(A) 연소에 따른 압력 상승

$$\frac{d\pi}{dn} = \frac{(\beta \pi^{\frac{1}{v_u}} - 1)\pi}{\frac{1}{v_b} \pi^{\frac{1}{v_u}} - (\frac{1}{v_b} - \frac{1}{v_u})(1-n)} \quad (7)$$

(B) 화염면, 미연, 기연 영역 온도 계산

$$\theta_u = \pi^{1 - \frac{1}{v_u}} \quad (8)$$

$$\theta_f = \frac{m_i C_{p(u)} \theta_u + m_i x_{H_2} \bar{h}_{H_2}^0}{m_e C_{p(b)} T_i} \quad (9)$$

$$\theta_b = \theta_f \left( \frac{\pi}{\pi_f} \right)^{1 - \frac{1}{v_b}} \quad (10)$$

(C) 열손실에 의한 기연영역 온도보정

열손실로 인해 기연영역의 온도가 저하될 때 열손실 항에 들어가는 대표 온도가 수정된 기연영역온도와 수정전의 기연영역 온도의 중간 값이라고 가정하면 식(11)과 같이 수정식을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_b &= \frac{C}{D} \\ C &= \left( m_e C_{v(b)} - \frac{V}{H} h \right) \theta_b + \frac{2V}{H} h \frac{T_i}{T_\infty} - \frac{A_f}{\delta_f} \\ D &= m_e C_{v(b)} + \frac{V}{H} h + \frac{A_f}{\delta_f} \end{aligned} \quad (11)$$

화염면에서의 기연영역 온도는 화염면 온도와 같으므로 화염면 온도를 식(12)와 같이 수정한다.

$$\frac{\tilde{\theta}_f}{\theta_f} = \frac{\tilde{\theta}_b}{\theta_b} \quad (12)$$

(D) 압력보정

기연영역 온도 보정에 의해 식(13)에 따라 압력 보정을 수행한다.

$$\frac{\tilde{\pi}_j}{\pi_j} = \left( \frac{\tilde{\theta}_b}{\theta_b} \right)^{\frac{1}{1-\frac{1}{\gamma_b}}} \quad (13)$$

(E) 소염조건 비교

기연 영역에서의 열손실과 반응으로 인한 생산량을 비교해서 소염 조건을 만족시키는지 확인한다. 소염 조건을 만족시키지 않으면 (A)~(D)를 반복하고 만족시키면 연소 반응을 중지시킨다. 전체 계산 간격은 층류 화염 두께를 기준으로 0.19mm로 정하였다. 화염 두께 만큼 기연 영역이 추가되면서 열에너지 생산량이 결정된다.

### 3. 결과

#### 3.1 열손실 효과

형상 축소된 연소기 실험에 대한 결과값을 바탕으로 만들어진 모델값을 평가하였다.[3] 계산 조건을 실험 조건과 동일하게 해서 계산을 수행하였다. 실험조건은 초기 연소실 압력 10-40 psi, 연소실 직경 15mm, 높이 0.61-3mm 사이의 값을 가진다.[3] 실험에서 연소기는 높이가 0.4mm에서 3mm 까지 높이 변화가 가능한 직경 15mm의 실린더형 정적 연소기이다. 실험에서는 당량비 1로 예혼합된 수소/공기 혼합기체를 연료로 사용하였으며 모델의 계산도 실험조건과 동일한 값을 이용하였다.

$h=0$  즉 열 손실이 없다고 가정했을 경우 만들어진 모델의 수치실험 결과는 아래와 같다. 열손실이 없는 연소기에서 연소종료시 기연영역 온도와 화염전파에 따른 기연 영역 체적 분율에 따른 압력, 미연 영역 온도, 화염면 온도 변화가 초기 값에 대한 비로 Figure 1에 제시되어 있다. 제시된 결과의 온도와 압력은 초기값으로 무차원화된 값으로 표시되었다. 화염이 전파되면서 연소기내의 온도 분포변화는 Figure 2와 같다. 일반적인 정적 연소기의 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

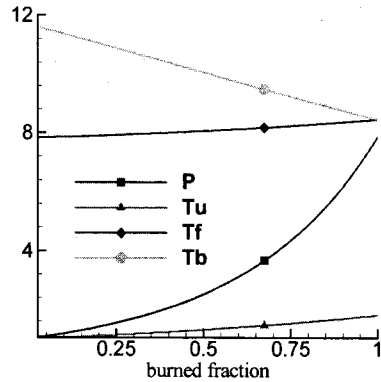


Fig.1 Property change by flame propagation

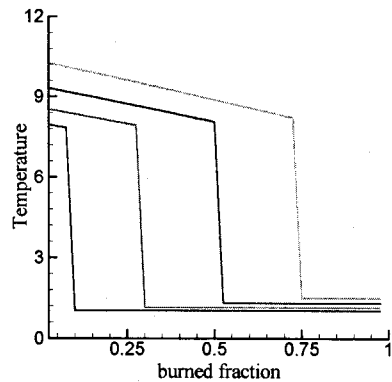


Fig.2 Temperature variation according to flame propagation

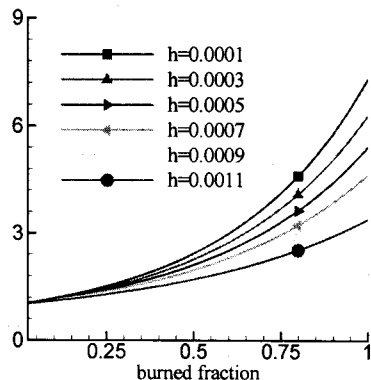


Fig.3 Pressure change by heat loss

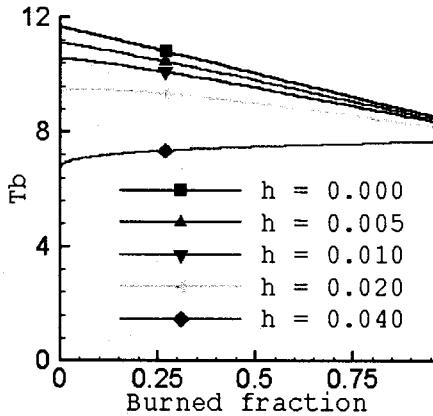


Fig.4 Burned region temperature drop by heat loss

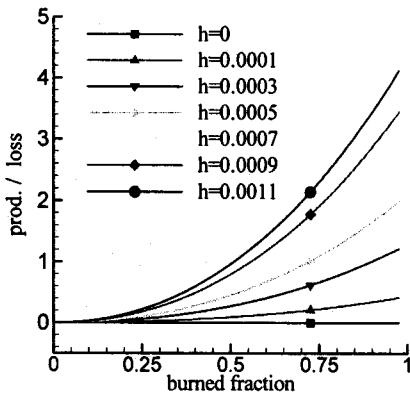


Fig.5 Heat production to loss ratio in each heat loss condition

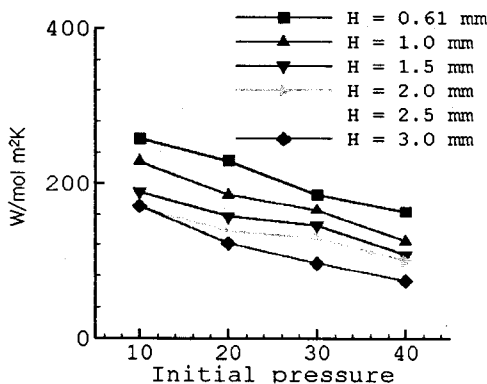


Fig.6 Normalized heat loss coefficient in each test condition

열손실이 있을 경우 즉  $h$  값이 0이 아닌 경우에 대해 열손실량에 따라 즉  $h$  값의 변화에 따라 기연 영역 온도 값과 압력 상승이 변하는 경향을 알아보았다. Figure 3은 열손실량 증가에 따른 압력 변화를 보여주고 Figure 4는 기연영역의 온도 변화를 보여준다. 열손실이 증가할수록 화염의 전파에 따른 압력상승과 온도 상승값이 저하되는 효과를 확인할 수 있다. 이와 같은 온도와 압력의 변화로부터 열손실 특성을 파악할 수 있다.

열손실량과 열생산량을 비교하면 소염 조건을 찾을 수 있다. 각 열손실 조건에 따른 열손실대 열생산의 비가 Figure 5에 나와 있다. 열손실 계수가 증가하면서 즉 열손실이 증가하면서 비가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 비의 값이 1이 되는 지점이 소염이 발생하는 지점이다. 소염이 발생할 때의 압력이 연소기에서 발생하는 최고 압력이므로 실험에서 얻어진 최고 압력과 소염 발생시의 압력의 비교를 통해서 각 실험조건에서의 열손실 계수 즉 열손실 조건을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 얻어진 열손실 계수를 초기 연료량으로 정규화 한 값이 Figure 6에 나와 있는 바와 같다. 전체적으로 연소기 높이가 낮아질수록, 연소기의 초기 압력이 낮아질수록 선형에 가까운 형태의 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

### 결론

형상이 축소되어 열손실이 증가한 연소기에서의 열손실 특성과 열손실로 인한 압력 온도 변화를 알기 위한 모델을 만들고 계산을 수행하였다. 형상축소된 연소기를 이용한 실험 결과를 바탕으로 한 비교를 통해서 제안된 모델을 통해 열손실 영향에 대한 평가와 소염 특성을 알 수 있음을 확인하였다. 이러한 방법을 통해 향후 미세한 크기 혹은 열손실을 무시할 수 없는 연소기 해석에 대한 새로운 접근 방법을 제시할 수 있었다.

### 참고문헌

[1] 이대훈, 권세진, 윤의식, “미세 엔진 개발 현황,” 한국 군사과학 기술학회 2000년 추계 학술 대회, 2000.  
 [2] A. H. Epstein, S. D. Senturia, G. Anathasuresh, A. Ayon, K. Breuer, K-S Chen, F. E. Erich, G. Gauba, R. Ghodssi, C. Groshenry, S. Jacobson, J. H. Lang, C-C Lin, A. Mehra, J. M. Miranda, S. Nagle, D. J. Orr, E. Piekos, M. A. Schmidt, G. Shirley, M. S. Spearing, C. S. Tan, Y-S Tzeng, I. A. Waitz, “Power MEMS and Microengines,”

*Transducers 97*, Chicago, 1997, pp. 753-756(2).

[3] D. H. Lee, K. H. Choi, S. Kwon, "Measurement and Modeling of Combustion in a Submillimeter Depth Combustor," *AIAA* 2001-3077, 2001.

[4] Bradley D. and Mitcheson. A., "Mathematical Solution for Explosions in Spherical Vessels," *Combust. Flame*, Vol. 26, 1976, pp. 201.

[5] B. Lewis and G. Elbe, "Combustion, Flame and Explosion of Gases," *Academic press*, 1987.

[6] T. Takeno, T. Iijima, "A Theoretical Analysis of Flame Propagation in Closed Vessels," *Tran. Japan Soc. Aero. Space Sci*, Vol. 28, No. 79. 1984.