

< 논문 >

마이크로 튜브 연소기의 연소특성에 대한 수치해석 연구

오창보[†] · 최병일* · 한용식* · 김명배*
(2005년 9월 26일 접수, 2005년 11월 8일 심사완료)

Numerical Study of Combustion Characteristics Inside a Micro-Tube Combustor

Chang Bo Oh, Byung Il Choi, Yong Shik Han and Myung Bae Kim

Key Words : Micro-tube(마이크로 튜브), Flame Quenching(소염), Flame Stability(화염 안정성), Heat Loss Effect(열손실 효과)

Abstract

Unsteady simulations were performed to investigate the flame structure and the dynamic behavior of a premixed flame exposed to the wall heat loss. A 3-step global reaction mechanism was adopted in this study. Simulations were performed for two tube combustors with inner diameters(d_i) of 1mm and 4mm. The material of tube combustor was assumed to be a Silicon Nitride(Si_3N_4). The heat loss from the outer tube wall was controlled by adjusting the amount of convective and radiative heat loss. A conical premixed flame could be stabilized inside a tube of $d_i=4\text{mm}$. The flame stability inside a tube of $d_i=4\text{mm}$ combustor was not much sensitive to the amount of heat loss. In case of a tube of $d_i=1\text{mm}$, an oscillating flame was observed in very low heat loss condition and a flame could not be sustained in realistic heat loss condition.

기호설명

u	: 혼합기 유속
I	: 단위 텐서(unit tensor)
T	: 온도
T_w	: 벽면온도
Y_i	: 화학종 i 의 질량분율
c_p	: 혼합기의 정압비열
c_{pi}	: 화학종 i 의 정압비열
c_{pw}	: 벽면의 비열
W_i	: 화학종 i 의 분자량
p_0	: 열역학적 압력(thermodynamic pressure)
p_1	: 수력학적 압력(hydrodynamic pressure)
D_{im}	: 혼합기 평균확산계수(mixture-averaged diffusion coefficient)
Q	: 열유속(heat flux)

R_0	: 일반기체상수(universal gas constant)
h_i^0	: 화학종 i 의 생성열(heat of formation)
d_i	: 튜브 내부 직경
h	: 대류열전달계수($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
x	: 축방향 거리
r	: 반경방향 거리

그리스 문자

ε	: 복사방사율(emissivity)
ρ	: 혼합기의 밀도
ρ_w	: 벽면의 밀도
ρ_0	: 주위 공기의 밀도 (reference density)
$\dot{\omega}_i$: 화학종 i 의 단위체적 당 물생성률
λ	: 혼합기의 열전도계수
λ_w	: 벽면의 열전도계수
μ	: 혼합기의 점성계수

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 에너지기체연구센터
E-mail : cboh@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7929 FAX : (042)868-7355

* 한국기계연구원 에너지기체연구센터

하첨자

$Cond$: 전도(Conduction)
$Conv$: 대류(Convection)

Rad : 복사(Radiation)

1. 서론

최근 기계, 전기 및 전자 등의 많은 분야에서 MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems)의 개발을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. MEMS의 개발 단계에서 중요한 요소기술 중 하나는 마이크로 스케일의 장비를 장시간 동안 구동시킬 수 있는 동력원을 개발하는 것이다. 초소형, 초경량의 시스템 구성을 위한 MEMS 동력원은 기본적으로 높은 에너지 밀도를 요구한다.

현재, 초소형 휴대용 장비에 많이 사용되고 있는 대표적인 리튬-이온(Li-ion) 배터리의 에너지 밀도는 1.2 MJ/kg 정도에 이르고 있다. 이에 반해, 탄화수소계 연료(40 MJ/kg)와 수소 연료(120 MJ/kg)는 리튬-이온 배터리에 비해 약 35배에서 100배정도 더 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에⁽¹⁾ 이들 연료의 에너지를 적절하게 이용하는 마이크로 동력장치를 개발한다면 MEMS의 구동에 적합할 것으로 전망된다. 현재까지는 연료전지가 이러한 연료 들의 높은 에너지 밀도를 이용하는 대표적인 동력원이라고 할 수 있지만, 최근에는 연료전지 이외에도 탄화수소계 혹은 수소 연료의 연소열을 직접 동력화 하는 장치에 대한 연구들도 이루어 지고 있다.^(2,3) 이렇게 연소열을 직접 동력원으로 이용하기 위해서는 마이크로 연소기에 대한 연구가 필수적이다.

마이크로 연소기에 대한 명확한 정의는 되어 있지 않지만, 일반적으로 소멸길이(quenching distance)정도 혹은 이보다 조금 큰 특성길이를 갖는 연소기를 마이크로 연소기로 칭하고 있다. 현 단계에서 마이크로 연소기를 개발하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 문제점이 있다. 그 중에서 가장 우선시 되는 것이 화염 안정화이다. 연소기의 크기가 초소형화 되면 연소기의 표면적/체적비가 증가하여 연소기 벽면으로의 열손실이 증가하며, 연소기의 특성길이가 소멸 길이와 비슷해지게 되어 화염을 안정적으로 유지하는 것이 어려워진다. 마이크로 연소기의 화염 안정성을 향상시키기 위해서는 초소형 스케일 연소기의 연소특성에 대한 구체적인 연구가 선행되어야 한다. 아직까지 이러한 스케일에서의 물리량 계측을 실험적 방법에만 의존하는 것이 쉽지 않기 때문에 전산 시뮬레이션의 역할이 많이 중요해지게 된다.

따라서, 본 연구에서는 마이크로 연소기의 연소특성을 검토할 목적으로 연소기 벽면의

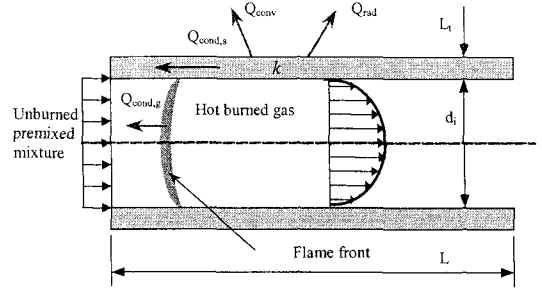


Fig. 1 Schematic of micro-tube combustor and heat loss mechanism from combustor

열손실과 연료의 유한 화학반응(finite chemistry)을 고려할 수 있는 수치계산 코드를 개발하였다. 또한, 실제 연소기의 열손실 기구를 포함하면서도 계산이 용이한 원통형 튜브 연소기에 대한 계산을 통해 마이크로 연소기의 연소특성을 고찰하였다.

2. 수치계산방법

2.1 2차원 수치계산법

Fig. 1은 마이크로 튜브 연소기의 형상 및 열손실 기구를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연소기의 화염 안정성을 잘 모사하기 위해서는 연소현상뿐만 아니라 연소기 외부 벽면에서의 열손실과 연소기 벽면내에서의 전도 열전달 효과도 잘 모사할 수 있어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 연소기 내부의 예혼합 연소특성을 적절히 모사할 수 있고, 벽면 열전달을 고려할 수 있는 비정상, 축대칭 2차원(2D) 수치계산 코드를 개발하였다. 지배방정식은 아래의 식 (1)-(6)와 같이 연속, 운동량, 화학종, 기체상(gas phase) 에너지방정식, 고체벽면에서의 열전도 방정식 그리고 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p_1 + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{im} \nabla Y_i) + W_i \dot{\omega}_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \tag{3}$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

$$-\sum_{i=1}^N W_i h_i^0 \dot{\omega}_i + \rho \sum_{i=1}^N (c_{pi} D_{im} \nabla Y_i \cdot \nabla T) \quad (4)$$

$$\rho_w c_{pw} \left(\frac{\partial T_w}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (\lambda_w \nabla T_w) \quad (5)$$

$$p_0 = \rho R_0 T \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i}{W_i} \right) \quad (6)$$

본 계산에서는 Soret, Dufour 효과 및 중력은 무시하였으며, 열역학적 물성치와 전달 물성치는 각각 CHEMKIN-II⁽⁴⁾ 및 TRANFIT Package⁽⁵⁾를 이용하여 계산하였다.

본 연구의 수치해석 기법은 직접수치모사법을 바탕으로 하고 있으며, 주어진 지배방정식을 추가적인 모델 없이 직접 풀게 된다. 방정식의 수치적분은 외제적(explicit) 방법을 이용하였는데, 정상상태(steady state) 해를 얻을 경우에는 연소기 벽면 온도분포를 얻는데 시간이 과도하게 소요되므로 고체벽면 열전도방정식의 시간간격과 그 이외의 방정식들에 대한 시간간격을 다르게 하여 계산시간을 단축하였다. 계산에 이용된 차분법과 구체적인 수치 알고리즘에 대해서는 참고문헌(6)에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

본 계산에서 다루게 될 연소조건은 당량비 1.0의 CH₄-공기 예혼합화염이며, 연소기는 각각 내경(d_i) 4mm와 1mm를 갖는 원통형 마이크로 튜브이다. 각 튜브 연소기의 벽면두께(L_i)는 $L_i/d_i=0.4$ 가 되도록 결정하였다. 연소기의 재질은 고온에 잘 견딜 수 있는 질화규소(Silicon Nitride; Si₃N₄)로 가정하였다. 각 연소기의 치수, 계산영역 및 격자는 Table 1에 자세히 기술되어 있다.

유속 경계조건으로, 튜브 입구에서는 0.5m/s로서 균일한 분포를 갖도록 하였으며, 노즐출구의 속도 경계조건은 1차 오더의 외삽법(extrapolation)을 이용하였다. 또한, 튜브 내부의 벽면에서는 No-slip 조건을 부가하였다. 화학종 농도는 모든 경계에서 농도구배가 0이 되도록 처리하였다. 에너지 방정식의 경계조건으로서, 튜브 내부의 벽면에서는 기체에서 고체 벽면으로 유입되는 열유속(heat flux)이 일정 하도록 처리하였으며, 튜브 외부 벽면에서의 손실 열유속은 식 (7)과 같이 대류 및 복사에 의한 효과를 고려하도록 하였다.

$$q_{w,o} = h(T_w - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

여기서, h 와 ε 는 각각 대류열전달계수와 복사방사

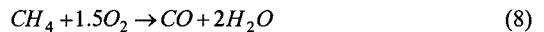
Table 1 Dimensions of combustor and simulation domain and grid system for the simulation

	Combustor 1	Combustor 2
Inner diameter (d_i)	1mm	4mm
Wall thickness (L_i)	0.4mm	1.6mm
Simulation Domain ($x \times r$)	10mm \times 0.9mm	25mm \times 3.6mm
Grid Number (Non-uniform grids)	180 \times 18 (8 for the wall)	210 \times 71 (20 for the wall)
Minimum grid spacing in x and r direction	0.03mm	0.04mm

율(emissivity)을 의미하여, T_∞ 는 연소기 외부의 유체온도로서 본 연구에서는 298K으로 가정하였다. 계산에서 h 값은 별도로 언급하는 경우를 제외하면, 실제 마이크로 연소기의 실험에서 얻을 수 있었던 값⁽⁷⁾과 유사하게 20 W/m²K로 고정하였다. 또한, 다양한 외부 열손실 조건을 구현하기 위해 ε 값을 변경하면서 계산을 수행하였다.

2.2 화학반응모델

본 연구에서는 CH₄의 예혼합 연소반응을 고려하기 위하여 3단계 총괄반응기구⁽⁸⁾를 사용 하였다. 현재의 연구와 향후 연구를 통해 검토 하고자 하는 연소조건은 대략 당량비가 0.6~1.0 이므로, 이 조건에서 실험이나 상세반응 기구로 계산한 연소속도를 합리적으로 잘 예측하도록 반응식의 상수들을 미소하게 수정하였다. 최종 계산에 이용된 반응기구는 식 (8)~(13)과 같으며, 식 (11)~(13)에서 화학종의 반응율은 kmol·m⁻³·s⁻¹의 단위를 갖는다.



$$-d[CH_4]/dt = 10^{11.90} \exp(-23,500/T) [CH_4]^{0.7} [O_2]^{0.8} \quad (11)$$

$$-d[CO]/dt = 10^{12.60} \exp(-19,400/T) [CO]^{1.0} [H_2O]^{0.5} [O_2]^{0.25} \quad (12)$$

$$-d[CO_2]/dt = 10^{12.40} \exp(-20,500/T) [CO]^{1.0} [H_2O]^{0.5} [O_2]^{0.25} \quad (13)$$

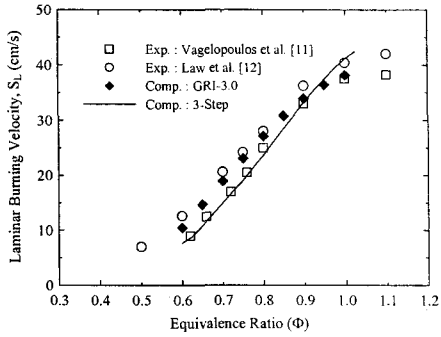


Fig. 2 Comparison of computed and measured laminar burning velocities

2.3 1 차원 예혼합화염 수치계산

열손실을 동반하는 튜브내의 2차원 예혼합 화염의 구조와 비교하기 위해 기존에 많이 이용되고 있는 1차원(1D) PREMIX 코드⁽⁹⁾를 수치 계산에 적용하였다. 1D 계산에서도 연료와 당량비 등 모든 초기조건은 튜브 연소기에 대한 2D 계산과 동일하게 하였고, 반응기구도 튜브 연소기에 대한 계산과 동일한 3단계 총괄반응 기구를 이용하였다. PREMIX 코드로 계산한 1D 예혼합화염은 화염대에서 주위로의 열손실이 없는 평평한 화염으로 볼 수 있다. 또한, 3단계 총괄반응기구의 연소속도 예측성능 검토를 위해 GRI-3.0⁽¹⁰⁾을 이용하여 연소속도를 계산하고 비교 자료로 사용하였다.

3. 결과 및 검토

Fig. 2는 PREMIX 코드에 3단계 총괄반응기구⁽⁸⁾를 적용하여 얻은 연소속도 결과이다. 3단계 총괄반응기구로 계산한 결과의 타당성을 검토하기 위해서 GRI-3.0으로 계산한 연소속도와 실험에서 얻어진 연소속도^(11,12)를 함께 도시하였다. 결과를 보면, 주어진 당량비 구간에서 3단계 총괄반응기구로 계산한 연소속도는 GRI-3.0으로 계산한 결과와 실험에서 얻어진 결과들을 비교적 잘 예측하고 있어 3단계 총괄반응기구를 이용하여도 본 연구에서 대상으로 하는 연소조건이 당량비 1.0인 조건에 대해서 합리적인 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 향후 수행하고자 하는 희박한 영역(0.6~1.0)에 대해서도 합리적인 결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 따라서, 계산시간을 고려한다면 3단계 총괄반응기구는 다양한 조건에 대한 파라메타 연구를 수행하는 본 연구의 수치계산에 적

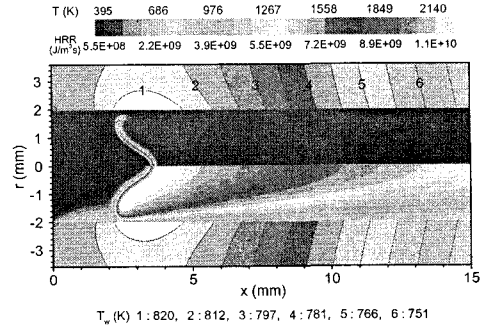


Fig. 3 Heat release rate, flame temperature and wall temperature for the case of $d_t=4\text{mm}$ tube combustor ($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon=0.9$)

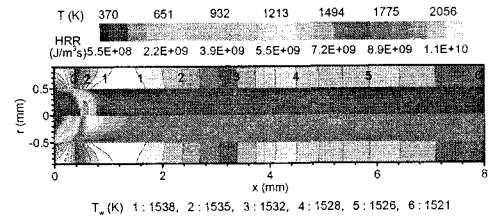


Fig. 4 Heat release rate, flame temperature and wall temperature for the case of $d_t=1\text{mm}$ tube combustor ($h=2\text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon=0$)

합할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 $d_t=4\text{mm}$ 인 튜브 연소기에 대한 수치해석 결과로서, $h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon=0.9$ 인 외부 열손실 조건에서 얻어진 정상상태 화염구조를 보여주고 있다. 튜브 내부의 상부 반은 열발생율(heat release rate; HRR)을 나타내며, 하부 반은 화염온도 분포를 나타낸다. 튜브 내부의 화염을 계산할 때, 벽면 온도를 상온상태에서 점화를 하면 튜브내에 화염이 안정화되지 못하고 하부로 점차 이동하여 계산 영역 밖으로 나가게 된다. 따라서, 본 연구에서는 모든 계산에서 점화 시 벽면온도를 $1,300\text{K}$ 으로 일정하다고 가정하여 화염을 안정화시켰다. 이것은 실제 튜브 연소기에서 점화 시 화염을 안정화시키기 위해서는 초기에 벽면을 가열하여야 함을 보여준다고 할 수 있다. 화염온도와 HRR 분포는, 유입된 혼합기가 반응에 의해 급격히 온도가 상승하여 원뿔(cone) 모양의 화염면을 형성하는 전형적인 튜브 내부의 예혼합화염의 구조를 보여주고 있다. 또한, 유입된 혼합기는 고온 벽면에 의해서 화염면에 도달하기 전에 가열되기 때문에 원뿔형 화염면의 가장자리에서 열발생율이 중심축보다 더 높은 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

결과를 도시하지는 않았지만, $d_t=4\text{mm}$ 의 경우에는 $h=20\text{ W/m}^2\text{K}$ 으로 고정시키고 ϵ 을 0~0.9 사이의

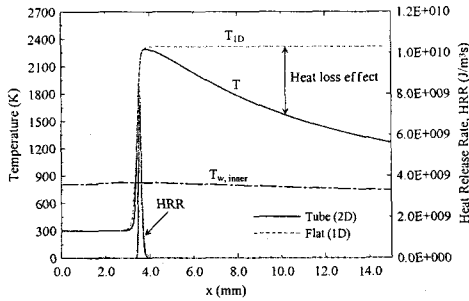


Fig. 5 Heat release rate and flame temperature at the centerline and inner wall temperature for the case of $d_i=4\text{mm}$ tube combustor

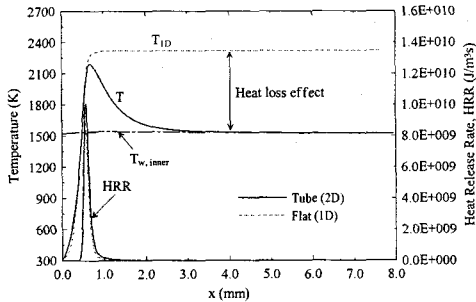


Fig. 6 Heat release rate and flame temperature at the centerline and inner wall temperature for the case of $d_i=1\text{mm}$ tube combustor

범위에서 바꾸어 보았을 때, 화염구조나 안정성은 열손실량에 크게 민감하지 않음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 연소기 재질로 사용한 질화규소의 방사율이 대략 0.8~0.9 정도⁽¹³⁾에 이르기 때문에 실제 연소조건에서 $d_i=4\text{mm}$ 의 튜브 연소기는 충분히 화염을 안정화시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 $d_i=1\text{mm}$ 의 경우에 대한 것으로서, $h=2\text{ W/m}^2\text{s}$, $\epsilon=0$ 인 열손실 조건에 대한 결과이다. 이 경우의 화염구조는 Fig. 3에서 보여준 $d_i=4\text{mm}$ 의 화염과는 다르다. 튜브 내부에 화염이 형성되고 있지만 화염면 형상은 평평하며, 화염온도 분포도 화염면 이후의 좁은 영역에서만 고온을 유지하고 하류로 이동하면서 급격히 감소되고 있음을 알 수 있다. 현재의 조건보다 열손실이 조금 더 커지면 ($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon=0$) 튜브의 상류와 하류로 진동하는 화염을 관찰할 수 있었으며, 이 이상으로 열손실이 좀 더 커지면 화염이 소멸되는 것을 확인하였다. 따라서, $d_i=1\text{mm}$ 의 튜브 연소기는 실제 연소 조건 하에서는 화염을 안정화시키기 어렵다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5~8에서는 Fig. 3와 4에서 보여준 튜브화염 구조에 대해 구체적으로 검토하고자 한다. 먼저, Fig. 5와 6은 각각 $d_i=4, 1\text{mm}$ 의 경우에 대해서 중심축상 화염온도와 열발생률분포, 그리고 튜브 연

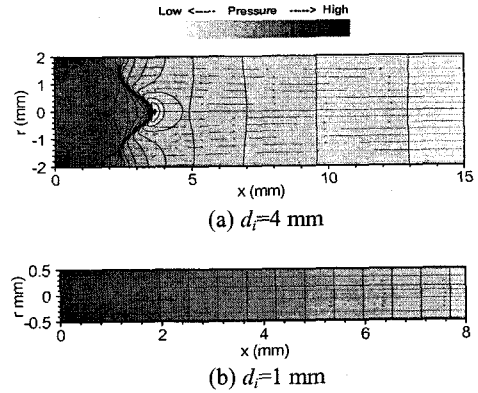


Fig. 7 Pressure distributions and stream lines inside micro-tube combustors of $d_i=4\text{mm}$ and 1mm

소기 내부 벽면상의 온도분포를 보여주고 있다. 각 그림의 열손실 조건은 Fig. 3와 4의 조건과 동일하다. 열손실이 없는 예혼합화염 결과를 참고하기 위해서 1D PREMIX 코드로 계산한 결과를 점선으로 함께 도시하였다. 1D 화염과 튜브 내 화염의 비교를 위해서 두 화염의 열발생률 최고점들이 동일한 위치에 오도록 1D 화염의 좌표를 조정하였다. Fig. 5의 결과에서 1D 화염과 튜브 화염의 HRR 분포는 유사하지만 화염면 하류의 온도분포는 많이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 1D 화염의 경우는 화염면 하류에서도 거의 온도가 일정한 반면, 튜브 내 화염의 경우에는 화염면을 기준으로 하류로 진행할수록 1D 화염보다 온도가 낮아지게 되는 데, 이는 튜브 벽면을 통한 연소기 외부로의 열손실에 기인한다. 화염온도 분포는 화염면을 기준으로 급격히 증가하므로 화염면보다 상류의 혼합기는 상온을 유지하게 된다. 하지만, 화염면 하류의 고온영역에서 벽면으로 열이 전달되고, 이 열이 상류로 전도(conduction)되어 벽면 근처의 혼합기 온도를 증가시키게 된다. 이러한 효과에 의해서 Fig. 3와 4에서 보는 바와 같이 벽면 근처의 HRR값은 증가되어 화염을 안정화 시키는데 기여하게 된다.

Fig. 6의 $d_i=1\text{mm}$ 의 결과에서는 중심축의 HRR이 1D 화염이나 $d_i=4\text{mm}$ 의 경우보다 크지만 화염면 하류의 온도는 $d_i=4\text{mm}$ 의 경우보다 더 낮고 급격히 감소하고 있다. 또한, 화염면 하류에서 급격히 감소된 화염온도는 연소기 벽면의 온도와 같아지게 됨을 알 수 있다. 튜브 직경이 작아질수록 연소기의 표면적/체적의 비가 증가하여 벽면을 통한 주위로의 열손실 효과가 커지게 된다. 따라서 직경이 작은 $d_i=1\text{mm}$ 의 경우에는 화염면 하류의 온

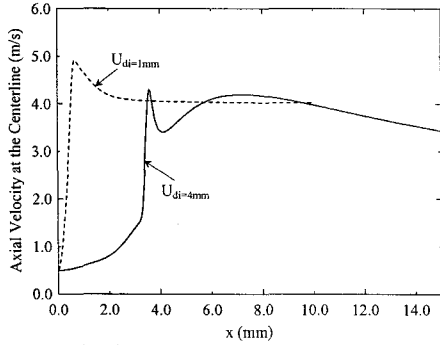


Fig. 8 Axial velocities at the centerline of micro-tube combustors of $d_i=4\text{mm}$ and 1mm

도가 $d_i=4\text{mm}$ 의 경우보다 더 급격히 감소하게 된다.

Fig. 7 (a)와 (b)에는 튜브 연소기 내부의 유동장 구조를 검토하기 위하여, 각각 $d_i=4, 1\text{mm}$ 연소기 내 압력분포와 유선분포를 도시하였다. (a)의 $d_i=4\text{mm}$ 경우에는 화염면을 기준으로 비교적 복잡한 압력분포를 보이고 있지만, (b)의 $d_i=1\text{mm}$ 경우에는 압력분포 형상이 매우 단순한 것을 알 수 있다. (a), (b) 모두 유선은 튜브 내로 유입되면서 중심축 방향으로 모이게 되며, 이 구간에서는 속도는 가속이 되게 된다. $d_i=4\text{mm}$ 인 경우, 화염면을 경계로 유선은 발산하게 되는데 화염면 전의 압력분포가 이를 잘 보여주고 있다. 중심축 화염면 바로 하류에서는 발산된 유선의 형태에 의해서 낮은 압력을 갖게 되며, 화염면 하류에서 발산된 유선들은 벽면에 의해서 다시 중심축 방향으로 약간 수렴된 후 하류로 향하게 된다. $d_i=4, 1\text{mm}$ 의 두 경우 모두, 압력 등고선이 직선에 가까운 부분에서는 완전 발달된(fully developed) 유속분포에 가까운 유동장을 갖게 된다.

Fig. 8에는 $d_i=4, 1\text{mm}$ 의 경우에 대해 중심축상 유속분포를 도시하였다. 두 경우의 유속분포는 화염면을 경계로 상류 및 하류에서 서로 다르다. $d_i=1\text{mm}$ 의 경우에는 유선이 연소기 벽면과 거의 평행을 이루는 단조로운 분포를 보이기 때문에 유속은 온도변화에 의한 밀도변화(열팽창 효과)에 거의 상응하는 변화를 보이게 되어 화염온도의 분포와 거의 유사하게 된다. 또한, $d_i=4\text{mm}$ 의 경우에는 유속분포는 Fig. 7의 유선분포를 이용해서 설명 가능하다. 초기구간에서는 유선이 중심축 방향으로 수렴되는 효과에 의해서 미소하게 가속되기 시작하여 반응에 의한 급격한 열팽창 효과에 의해서 유속이 급격히 증가하게 된다. 화염면 바로 하류에서는 유선이 발산되면서 유속이 감소하였다가

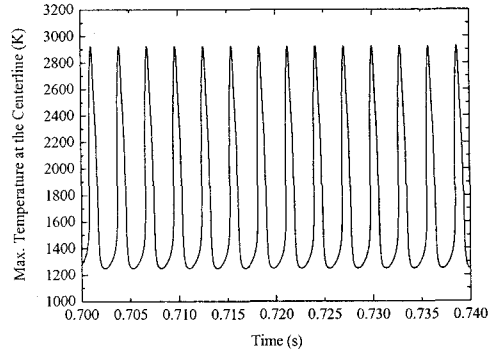


Fig. 9 Temporal variation in the maximum temperature at the centerline of $d_i=1\text{mm}$ tube combustor ($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon=0$)

이후 유선이 연소기 벽면에 의해 다시 중심축 방향으로 수렴되고 온도가 저감되면서 속도는 증가하다 감소하는 경향을 보이게 된다. 이렇듯 튜브 직경변화에 의한 연소특성과 튜브 벽에 의한 제한적 공간이 튜브 내 유속분포에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

지금부터는 Fig. 4에서 간략히 설명한 $d_i=1\text{mm}$ 의 튜브 연소기 내부에서 진동하는 화염에 대해 고찰하고자 한다. 먼저, Fig. 9에는 $h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\epsilon=0$ 인 열손실 조건에서 시간진행에 따른 중심축상의 최고온도의 변화를 도시하였다. 초기에 벽면온도를 $1,300\text{K}$ 으로 일정하게 주고 점화를 시키면 화염이 튜브 상류에 안정화 되었다가(Fig. 4와 유사) 점차 연소기 외부로의 열손실 효과가 커지면서 벽면온도가 낮아지게 되고, 어느 순간에 화염을 보일 수 없을 정도에 이르게 되면 튜브 관내의 앞뒤로 진동하는 예혼합화염이 관찰되게 된다. 초기에는 중심축 최고온도의 진폭이 작고 높은 주파수를 갖는 화염이 관찰되지만 시간이 경과하면서 점차 최고온도의 진폭은 증가하고 진동 주파수는 감소하여 진폭과 주파수가 거의 일정한 준정상상태(quasi steady state)에 이르는 것을 확인하였다. 그림의 결과는 준정상상태에 도달한 화염에 대한 것으로서, 최고온도가 대략 $1,250\text{K}$ 에서 $2,920\text{K}$ 까지 주기적으로 변동하며, 변동 주파수는 약 350Hz 정도에 이르고 있다.

Fig. 10과 11에는 주기적으로 진동하는 화염의 열발생율, 화염온도 및 벽면온도를 시간별로 도시한 것이다. Fig. 11에는 화염온도와 벽면온도를 동일한 스케일로 도시하였다. 초기에 $1,300\text{K}$ 의 일정한 온도로 가열되었던 벽면이 냉각되면서 튜브 입구 근처에서 안정되었던 화염은 어느 순간에 화염강도가 약화되면서 소멸된다. 이후 반응에 참여하지 못한 혼합기는 하류로 대류되고 벽면온도가 높

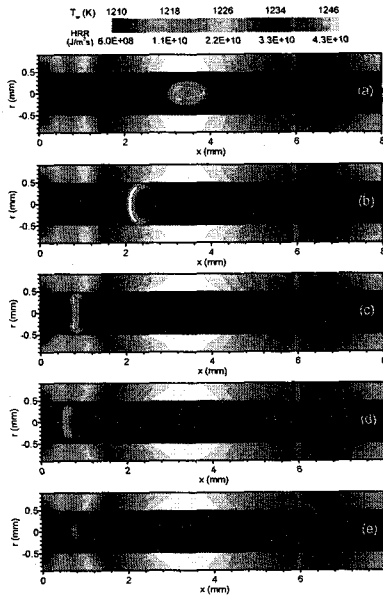


Fig. 10 Oscillating heat release rate and wall temperature of $d_i=1\text{mm}$ tube combustor ($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon=0$). (a) 0 ms, (b) 0.15 ms, (c) 0.4 ms, (d) 0.6 ms, (e) 0.8 ms

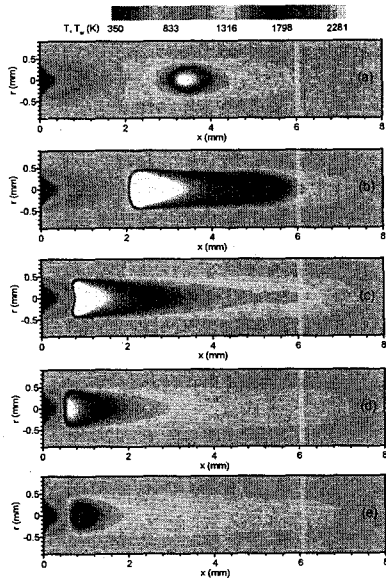


Fig. 11 Oscillating flame temperature and wall temperature of $d_i=1\text{mm}$ tube combustor ($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon=0$). (a) 0 ms, (b) 0.15 ms, (c) 0.4 ms, (d) 0.6 ms, (e) 0.8 ms

은 영역근처에서 다시 재점화되어 상류로 전파하게 된다. 상류로 전파된 화염면은 튜브 입구 근처의 차가운 혼합기가 화염면으로 유입되면서 주위의 열손실을 극복할 정도의 충분한 열을 발생시키지 못하고 소멸되고, 다시 하류에서 재점화되는

주기적인 진동현상을 보인다. Fig. 10과 11의 HRR과 화염온도의 변화 및 공간분포가 튜브의 상류로 전파된 후 소멸되고 하류에서 재점화되는, 진동화염의 구조를 잘 보여주고 있다. 이러한 마이크로 튜브 내에서의 화염 진동현상은 기존의 실험연구⁽¹⁴⁾에서도 관찰된 바 있는 흥미있는 현상으로서 향후, 연소조건을 다양하게 변경하면서 구체적으로 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다

본 연구에서는 마이크로 튜브 연소기 내부의 기초적인 연소특성에 대해 주로 고찰하였다. 향후 진행될 연구에는 마이크로 튜브 연소기의 화염안정성에 대한 종합적인 자료를 얻기 위해서 튜브의 치수 및 재료, 당량비, 유속 등의 연소조건에 대한 파라메타 연구와 실험을 병행하여 비교 검토할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 튜브 내부의 CH_4 -공기에 혼합화염을 유한 화학반응모델을 이용하여 계산하며 벽면 열전달을 고려할 수 있는 수치계산 코드를 개발하였다.

마이크로 튜브 내경이 1mm와 4mm인 두 연소기에 대해 연소기 외부로의 열손실량을 조절하면서 계산을 수행하였다. 내경이 4mm인 경우에는 외부 열손실에 거의 무관하게 마이크로 튜브 내부에 원뿔형의 안정된 화염을 얻을 수 있었으며, 실제 실험과 유사한 조건($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon=0.9$)에서도 안정된 화염을 얻을 수 있었다. 반면에 내경이 1mm인 경우에는 현실적인 조건에서는 안정된 화염을 얻을 수 없었으며, 매우 낮은 열손실 조건에서 ($h=20\text{ W/m}^2\text{K}$, $\varepsilon=0$)는 튜브의 입구 근처에서 소멸된 후 하류의 고온 벽면근처에서 재점화되어 상류로 전파하는 진동화염을 관찰할 수 있었다. 이를 통해 내경이 1mm이하의 튜브 연소기에서는 별도의 화염안정화 방안 없이는 화염을 유지시키는 것이 어렵다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 향후 진행될 실험과 상세반응기구를 이용한 계산에 유용한 참고자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 한국기계연구원의 2005년도 자체사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Fernandez-Pello, A. C., 2002, "Micro-Power Generation Using Combustion : Issues and Approaches," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 883~899.
- (2) Jacobson, S. A. and Epstein, A. H., 2003, "An Informal Survey of Power MEMS," *The International Symposium on Micro-Mechanical Engineering*, December, *ISMME2003-K18*.
- (3) Na, H., Lee, D. H. and Kwon, S., 2005, "Study on Combustion Performance and Burning Velocity in a Micro Combustor," *Transactions of the KSME B*, Vol. 29, No. 6, pp. 662~670.
- (4) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *SAND89-8009B*.
- (5) Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1986, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *SAND86-8246*.
- (6) Oh, C. B., Park, J. and Lee, C. E., 2004, "Numerical Investigation of Extinction in a Counterflow Nonpremixed Flame Perturbed by a Vortex," *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 137~150.
- (7) Kim, N. I., Kato, S., Kataoka, T., Yokomori, T., Maruyama, S., Fujimori, T. and Maruta, K., 2005, "Flame Stabilization and Emission of Small Swiss-roll Combustors as Heaters," *Combustion and Flame*, Vol. 141, pp. 229~240.
- (8) Dryer, F. L. and Glassman, I., 1972, "High Temperature Oxidation of CO and CH₄," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 14, pp. 987~1003.
- (9) Kee, R. J., Grcar, J. F., Smooke, M. D. and Miller, J. A., 1985, "A Fortran Program for Modeling Steady Laminar One-dimensional Premixed Flames," *SAND85-8240*.
- (10) Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Song, S., Gardiner, W. C., Lissianski, V. and Qin, Z., http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- (11) Vagelopoulos, C. M., Egolfopoulos, F. N. and Law, C. K., 1994, "Further Considerations on the Determination of Laminar Flame Speeds with the Counterflow Twin-flame Technique," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 25, pp. 1341~1347.
- (12) Law, C. K., 1993, "A Compilation of Experimental Data on Laminar Burning Velocities," *Peters, N., Rogg, B., Editors. Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems*, Berlin : Springer, pp. 15~26.
- (13) Johnson, P. E., DeWitt, D. P. and Taylor, R. E., 1981, "Method for Measuring High Temperature Spectral Emissivity of Nonconducting Materials," *AIAA Journal*, Vol. 19, No. 1, pp. 113~120.
- (14) Maruta, K., Kataoka, T., Kim, N. I., Minaev, S. and Fursenko, R., 2005, "Characteristics of Combustion in a Narrow Channel with a Temperature Gradient," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2429~2436.