배플이 부착된 마이크로 연소기의 난류유동 및 연소에 대한 수치해석 연구

김원현^a · 박태선^{a,*}

Numerical Study of Turbulent Flow and Combustion in a Micro Combustor with a Baffle Plate

Won Hyun Kim^a · Tae Seon Park^{a,*}

^a School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

ABSTRACT

Turbulent flow and combustion characteristics in a micro can combustor with a baffle plate are investigated by a Reynolds Stress Model. In order to examine the geometric effects on the turbulent combusting flow, several baffle configurations are selected. The interrelation between the flow structure and the thermal field are investigated by examining the variation of recirculation region, flame length and heat loss. For the flow mixing, the decreasing air hole is more efficient than the decrease of the fuel hole. As the fuel or air hole diameter decreases, combustion efficiency is enhanced and flame length is decreased. Additionally, as the diameter of air hole decreases, the heat loss and combustion temperature are increased, while they are reduced with decreasing the diameter of fuel hole.

초 록

배플이 있는 마이크로 연소기의 난류유동 및 연소특성이 레이놀즈 응력 모형에 의하여 조사되었다. 형상변화에 따른 난류 연소유동 대한 영향을 살펴보기 위하여, 여러 개의 배플형상이 선택되었다. 유동 구조와 온도장의 상관관계가 재순환 영역, 화염크기, 열손실 변화에 의해 조사되었다. 유동혼합은 연료 유입구의 직경을 감소시키는 것보다 공기유입구의 직경을 감소시키는 것이 더 효율적이었다. 연료 또는 공기유입구의 직경이 감소함에 따라 연소효율은 증가하였고, 화염길이는 감소하였다. 또한, 공기유입구의 직경이 감소함에 따라 연소온도와 열손실이 증가하고, 반면에 연료유입구의 직경이 감소함에 따라 연소온도와 열손실은 감소되었다.

Key Words: Diameter Ratio(직경비), Recirculating Flow(재순환 유동), Flame Length(화염길이)

Received 2 June 2013 / Revised 11 October 2013 / Accepted 20 October 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 30-31, 부산 해운대 한화리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

D	: combustion chamber diameter
D_f	: fuel hole diameter
D_o	: air hole diameter
D_t	: wall thickness
D_b	: baffle thickness
DR	: diameter ratio, $DR=D_f/D_o$
h	: convection heat transfer coefficient, $h=-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)$
L	: combustion chamber length
L_b	: entrance length
P	: pressure
S_{ij}	: strain rate tensor, $S_{ij}=\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i}+\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)$
T	: temperature
T_w	: inner wall temperature
T_∞	: outer wall temperature
TKE	: turbulent kinetic energy
q_w	: heat flux of wall, $q_w=hA(T_w-T_\infty)$
U_f	: axial mean velocity of fuel
U_o	: axial mean velocity of air
$\overline{u_i u_j}$	: Reynolds stress tensor
W_{ij}	: vorticity tensor, $W_{ij}=\left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i}-\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right)$
Y_i	: mean mass fraction
k	: thermal conductivity
ν	: kinetic viscosity
ρ	: density

1. 서 론

최근 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술이 발달함에 따라 마이크로 혹은 나노 스케일의 장비를 구동시킬 수 있는 연소기반의 마이크로 동력발생장치에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, 차세대 전지로 큰 관심을 받고 있는 고체산화물연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)의 중요 구성품으로서 높은 효율성을 보여주고 있는 마이크로 연소기에 관한 연구가 주목받고 있다.

마이크로 연소기에 대한 정의는 일반적으로 소염길이(quenching distance)정도의 연소실 크기를 가지는 연소기로 정의된다[1]. 마이크로 연소기에서는 형상에 의한 제한성으로 인해 난류 유동의 발달이 어렵기 때문에 연료와 산화제간의 혼합이 충분하게 이루어지지 않아 불완전 연소에 의한 연소 불안정, 소염 등의 문제가 나타날 수 있다[2-7]. 또한, 마이크로 연소기는 표면적/부피비가 매우 큰 형상특징을 가지고 있다. 보통 연소기에서 에너지 생성은 부피에 비례하고 열손실에 관계된 열유속은 표면적에 비례한다. 따라서 연소기의 크기가 작아질수록 열손실이 증가하게 되어 화염구조를 안정하게 유지하기 어려워진다. 즉, 마이크로 연소기에서는 불완전한 유동혼합과 열손실의 증가에 따른 문제점이 설계과정에서 반영되어야 좋은 설계가 이루어질 수 있다.

이러한 문제점 중에서 배플을 이용하여 유동혼합을 증가시키기 위한 방법에 대한 연구가 진행되어 왔다[3-7]. Choi[3-6]등과 Woodfield[7]등은 축 중심의 연료유입구 주위에 6개의 공기유입구를 환형으로 분포시킨 배플을 이용하여 재순환 유동을 생성하였다. 이러한 형상은 연료와 공기의 큰 운동량 차이로 강한 재순환영역이 생성되는 장점이 있다. 배플에 의한 재순환 유동의 발달은 유체간의 혼합정도를 증가시켜 안정화된 화염영역을 형성하는 특징이 있다. 그렇지만, 연소조건과 비연소 조건에서 형상변화에 따른 유동구조는 매우 다르게 나타난다. 따라서 연소기 설계를 위해서는 연소조건에 대한 연구가 필요하게 된다.

연소기의 연소특성은 연료와 산화제의 혼합특성변화에 큰 영향을 받기 때문에 연소기 내부의 유동구조 변화를 살펴보는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 배플이 있는 마이크로 연소기에서 연료와 산화제 유입구의 직경변화에 대한 난류 유동구조 및 연소특성 변화를 살펴보고자 한다. 선행 연구에서 형상변화에 따른 연소특성 변화를 살펴 본 사례가 없기 때문에 마이크로 연소기 설계에 연구결과가 기여할 것으로 생각된다. 해석 결과로부터 유동구조 및 혼합도,

Fig. 1 Computational domain.

화염길이, 연소효율 및 열손실 등의 변화를 비교하였다.

2. 해석 방법

3차원 정상상태, 비압축성 난류유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

여기서 D_{ij} , P_{ij} , ϕ_{ij} , ε_{ij} 는 확산항, 생성항, 압력-변형율, 점성 소산항이고 자세한 기술은 생략하기로 한다[8].

본 연구는 형상변화에 따른 연소유동을 살펴보는 것이기 때문에 연소모델은 일반적인 1단계 반응식에 근거한 eddy-dissipation 모델을 적용하였다[8].

Table 1. Geometric condition of computational domain for all cases.

$DR(D_f/D_o)$	D_b/D	D_t/D	L/D	L_b/D	Re_f
0.125~8.0	0.05	0.05	2	15	3,060

Fig. 2 Streamwise mean velocity and temperature distribution for different grids.

질량분율 Y_i 에 대한 지배방정식은 다음과 같다[8].

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j Y_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j} J_i + R_i \quad (5)$$

여기서 J_i 는 난류유동에 의한 확산율, R_i 는 화학반응에 의한 생성율을 나타낸다.

형상조건과 계산영역을 Table 1과 Fig. 1에 나타내었고, 관련 실험결과로부터 결정된 Choi[3-6] 등의 형상을 기준조건으로 선택하였다($D=0.022$ m). 그림과 같이 배플 중심의 연료(CH_4) 유입구 주위로 6개의 공기 유입구가 환형으로 분포하고, 출구, 내·외벽면 등의 경계조건을 가지고 있다. 직경비 변화에 따른 배플의 형상에 대한 레이놀즈 수($Re_f=U_f D_f/\nu$)는 CH_4 제트유동의 직경을 기준으로 모두 동일하게 적용하였고, 질량유량을 일정하게 유지하기 위하여 Air/CH_4 의 질량유량의 비를 17.11로 선택하였다. 이는 CH_4 - Air 의 완전연소조건(당량비, $\Phi=1$)과 동일하다. 본 연구는 실제 시스템을 대상으로 하는 것이 아니고 배플이 부착된 마이크로 연소기에서 형상변화에 따른 연소특성 변화를 살펴보는 것이 주된 목적이기 때문에 이론 당량비 조건을 이용하여 CH_4 와 Air 에 대한 유입조건을 선택하였다.

배플의 형상변화를 고려하기 위해 직경비가 1

Fig. 3 Comparison of vector plot at x-z plane for the case $DR=1$ by different turbulent models.

인 경우를 기준으로 공기유입구의 직경($D_o=0.004$ m)이 일정할 때 연료유입구의 직경이 감소하는 경우($DR<1$) $DR=0.75, 0.5, 0.25, 0.125$ 인 4개의 형상을 선택하였고, 연료유입구의 직경($D_f=0.004$ m)이 일정할 때 공기유입구의 직경이 감소하는 경우($DR>1$) $DR=1.33, 2, 4, 8$ 인 4개의 배플형상을 선택하였다. 난류 속도분포가 발달할 수 있도록 입구노즐의 입구길이는 $2D$ 를 설정하였고, 출구면에는 압력-출구(pressure outlet)조건을 적용하였다. Fluent 6.3[8]를 사용하여 압력-속도 연결은 SIMPLEC 알고리즘, 대류항과 확산항의 차분화에 2차 정확도의 풍상차분법을 선택하였다.

또한, 연소기 벽면에서의 열손실을 살펴보기 위해 외벽온도는 300K의 일정온도 조건이 부여되었고 내벽의 온도가 열유속평형에 의해 결정되는 복합열전달(conjugate heat transfer) 해석이 수행되었다. 벽면재질은 일반적인 금속재료인 텅스텐을 선택하였고, 벽면두께는 Choi와 Park[4]의 연구를 참고하여 연소기 직경의 5%를 선택하였다. 수렴 판정기준은 1.0×10^{-5} 으로 선택하였다.

적절한 격자해상도를 선택하기 위해 검사체적수를 80만(Grid 1), 150만(Grid 2), 300만(Grid 3)

Fig. 4 Streamwise velocity distribution on the fuel hole centerline.

개에 대해 중심선에서 평균속도와 온도분포를 Fig. 2에 비교하였다. 격자수 150만개 이상에서 해상도가 적절함을 알 수 있다. 재순환영역이 강하게 나타나는 배플 근처에 격자수를 추가하여 150~160만개 수준의 격자계를 선택하였다. 문헌 조사에 의하면 배플이 부착된 마이크로 연소기에 대한 실험 및 수치해석 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 비연소 유동조건이지만 해석방법의 타당성을 살펴보기 위하여 Fig. 3에 속도 벡터분포를 Choi와 Park[4]의 해석결과와 비교하였다. 난류모델이 다르기 때문에 재순환 유동의 크기와 위치는 다르지만, 전체적인 유동구조를 잘 예측하고 있다. 연소조건인 경우 밀도변화가 크게 발생되기 때문에 유동구조는 비연소 조건과 매우 다르게 나타날 것이다. 그렇지만, 형상 특징으로 연소실 벽면과 중앙부근의 재순환 유동구조는 비연소 조건과 유사하게 존재할 것으로 생각된다. 따라서 연소조건인 유동구조를 정성적으로 해석하는데 타당성을 가질 것으로 생각된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난류 유동 및 혼합특성의 변화

Fig. 5 Turbulent kinetic energy distribution along the centerline.

Fig. 4는 배플의 형상변화에 따른 축 중심선상의 주유동방향 속도변화를 나타낸 것이다. 여기서 U_f 와 D_f 는 $DR=1$ 일 때 연료유입구의 직경과 평균속도이다. 형상변화에 따른 연소유동의 변화를 상대적으로 관찰하기 위하여 기준조건 $DR=1$ 에 대한 연료 유입구 직경과 속도조건을 무차원화를 위한 참고값으로 선택하였다. 전체적으로 연료유입구 출구면 부근에서 급격한 속도감소가 나타나고 있다. 연료 또는 공기유입구 직경이 감소할수록 각 유입구의 출구면 근처에서 평균 속도감소는 더욱 빠르게 나타나고, $DR<1$ 에 비해 $DR>1$ 인 경우의 속도감소가 더욱 크게 나타난다. 특히, $DR>1$ 인 경우 $x/D_f=2\sim8$ 에서 평균속도가 음이 되어 재순환 유동이 발생되고 있음을 알 수 있다. 이러한 재순환 영역은 공기유입구의 직경이 감소할수록 그 크기와 강도가 증가하고 있다. 배플에 의해 발생하는 재순환유동의 발생은 난류운동에너지를 증가시킬 수 있다. 이러한 변화를 살펴보기 위해 축 중심선에서 난류운동에너지의 분포를 Fig. 5에 비교하였다. 그림을 보면 $x/D_f \leq 8$ 인 영역에서 난류 운동에너지가 급격하게 증가하고, 하류영역으로 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. $DR<1$ 의 경우에 비해 $DR>1$ 의 경우 난류운동에너지의 최대값이 더욱 크게 나타나고, 공기 및 연료유입구가 감소함에 따라

(a) $DR<1$, D_f decreased (b) $DR>1$, D_o decreased

Fig. 6 Streamlines for different diameter ratios.

난류운동에너지의 최대값이 나타나는 지점이 배플쪽으로 이동하고 있다. 특히, Fig 4에서 확인할 수 있는 속도변형률이 큰 구간에서 난류운동에너지가 급격히 증가하고, 이는 작은 스케일의 유동혼합을 증가시키는데 기여할 것으로 생각된다.

배플 형상변화에 따른 유동구조 변화를 살펴보기 위해 x - y 단면의 유선분포를 Fig. 6에 나타내었다. 선택된 모든 경우에서 유사한 구조의 재순환유동이 발생되고 있다. $DR=1$ 보다 연료 또는 공기유입구가 작아지는 경우 연소실 벽면 근처의 재순환 유동의 크기는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한, $DR=2, 4, 8$ 에 대해서 연료가 유입되는 연소실 축중심에 재순환유동이 추가적으로 발생되고 있다. 이러한 재순환유동의 발생과 변화는 연료와 공기의 혼합특성을 변화시키게 된다. 특히, 서로 다른 재순환유동간의 간섭이 나타나는 $DR>1$ 의 경우가 단순히 벽면에서 발생하는 재순환유동에 의해 유동장이 변화하는 $DR<1$ 보다 유동 변화가 더욱 크게 나타나고, 이는 혼합특성변화에도 큰 영향을 미칠 것으로 생

Fig. 7 Streamlines of cross-sectional plane at $x/D_f=2$, 4 and 6 for $DR<1$ and $DR>1$.

각된다.

Fig. 7은 재순환영역이 활발하게 나타나고 있는 $x/D_f=1$, 4와 $x/D_f=10$ 인 지점에서 y - z 단면의 유선분포를 나타낸 것이다. 여기서 $x/D_f=1$ 은 벽면 재순환영역이 유동변화에 지배적인 지점, $x/D_f=4$ 는 $DR>1$ 인 경우 축 중심에서 재순환 유동이 나타나는 지점, $x/D_f=10$ 은 재순환유동이 나타나지 않는 하류영역을 선택한 것이다. 그림을 살펴보면 선택된 영역에서 주유동에 수직한 방향으로 2차유동의 발달이 벽면근처에서 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있다. $x/D_f=1$, 4인 지점에서 대칭적인 와유동 구조로 발달하는 2차유동은 하류영역($x/D_f=4$, 10)으로 갈수록 대칭적인 와유동구조가 쇠퇴하면서 반경방향으로 확장되어 가고 있다. 이러한 2차유동 구조의 변화는 연료와 공기의 혼합특성을 변화시킬 수 있고, 연소

(a) $DR<1$, D_f decreased (b) $DR>1$, D_o decreased

Fig. 8 Iso-surface of Q -criteria, $Q=-0.005$.

특성변화에도 큰 영향을 줄 것으로 생각할 수 있다. 결과적으로 Fig. 6~7을 통해 배플이 있는 연소기에서는 연소실 벽면과 축 중심에 존재하는 재순환유동이 3차원적으로 발달하고 연료와 공기유입구 직경크기 변화에 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

전체 유동장의 3차원적인 유동구조의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 8에 $Q=-0.005$ 인 와도분포를 나타내었다. 여기서 $Q = S_{ij}S_{ij} - W_{ij}W_{ij}$ 으로 정의된다[9]. Q 가 음의 값을 가지면 와유동이 지배적인 것을 의미한다. 그림을 보면 연소실 벽면 근처와 중심부에서 3차원적인 와유동구조의 변화를 확인할 수 있다. $DR<1$ 인 경우 연료주입구 직경이 감소함에 따라 와유동구조가 배플쪽으로 이동하면서 밀집되고 있다. 반면, $DR>1$ 인 경우는 공기유입구 직경이 감소함에 따라 벽면과 축중심의 와유동구조가 하류영역으로 발달하면서 그 크기가 증가하고 있다. 이는 Fig. 7의 유선분포에서 확인한 재순환 영역의 발달과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4~8에서 살펴본 유동구조의 변화를 통해

Fig. 9 Mixedness and mixing length for different DR

예측한 혼합특성의 변화를 정량적으로 비교하기 위해 다음과 같이 혼합도 $M[9]$ 을 도입하였다.

$$M = \frac{\int [Y_i(x, y, z) - Y_{i,av}(x)]^2 dy dz}{\int [Y_i(0, y, z) - Y_{i,av}(0)]^2 dy dz} \quad (6)$$

여기서 $Y_{i,av} = (1/A) \int Y_i(x, y, z) dy dz$, A 는 단면적을 나타내고, M 의 값이 0에 가까울수록 혼합이 잘 이루어짐을 나타낸다. Fig. 9(a)에서 공기 또는 연료의 직경이 감소할수록 유체간의 혼합이 빠르게 이루어지고, 혼합이 완전히 이루어지는 지점도 배플쪽으로 이동하고 있음을 알

Fig. 10 Temperature distribution for different diameter ratios along the centerline.

수 있다. $M=0.01$, 즉 혼합이 99% 이루어지는 지점까지의 거리로 정의된 혼합길이(L_M)를 비교한 Fig. 9(b)를 보면 연료유입구의 직경이 감소하는 경우보다 공기유입구의 직경이 감소하는 경우의 혼합거리가 더욱 빠르게 감소하고 있다. 이것은 공기유입구를 작게 하는 것이 연료유입구를 작게 하는 것보다 빠른 혼합을 유도하는 것으로 생각할 수 있다.

3.2 연소 특성의 변화

Fig. 10은 마이크로 연소기 중심선에서 온도분포를 나타낸 것이다. $DR=1$ 을 기준으로 선택된 모든 경우에서 높은 온도가 유지되고 있고, 형상 변화에 따라서는 $DR < 1$ 에 비해 $DR > 1$ 의 배플형상 변화가 빠른 온도 상승을 초래하고 있다. 또한, 최고온도가 나타나는 지점은 DR 이 감소하거나 증가할수록 배플쪽으로 이동하고 있고, 변화 폭은 직경비가 1보다 큰 경우가 더욱 크게 나타난다. 이러한 결과는 Fig. 9에서 살펴본 혼합특성의 변화와 밀접한 관련이 있다. 즉, 유체간의 혼합이 활발히 이루어질수록 연소온도가 높게 나타나고 최대온도도 증가하고 있다.

Fig. 11은 $z=0$ 인 지점에서 x - y 단면의 온도분포를 나타낸 것으로, 배플 형상변화에 따른 화염의

Fig. 11 Temperature contour of x - y plane at $z=0$ for all cases (Solid line : stoichiometric iso-line).

크기를 알 수 있다. 그림에서 실선은 Eq. 4를 토대로 완전연소가 일어나는 메탄의 질량분율이 0.055인 화학양론비 증가선을 나타낸 것이다. $DR=1$ 에 비해 DR 이 증가하거나 감소함에 따라 화염의 크기는 감소하고 있고, 이러한 화염크기의 변화는 $DR>1$ 인 경우가 $DR<1$ 에 비해 더욱 크게 나타난다. 이것은 Fig. 6의 유동구조와 Fig. 9의 혼합특성 변화와 밀접한 관련이 있다. 즉, $DR<1$ 인 경우는 축 중심에서 발생되는 재순환 유동이 나타나지 않기 때문에 제트화염의 형태가 유지되지만, $DR=2.0\sim 8.0$ 인 경우 축 중심에서 재순환유동이 발생되기 때문에 일반적인 제트화염과 달리 연소실에서 반경방향으로의 화염전파가 빠르게 나타나고 있다. 특히, 선택된 모든 경

Fig. 12 Axial evolution of temperature contour at $x/D_f=2, 4$ for $DR<1$ and $DR>1$.

우에서 화학양론비 증가선을 따라 화염이 발달하고 있는데, 배플형상 변화에 따른 화학양론비 증가선의 변화는 Fig. 8(b)에 나타난 혼합길이의 변화특징과 유사하게 나타나고 있다. 이는 배플에 의한 혼합특성변화가 연소장에 반영된 결과를 알 수 있다. 또한, 공기유입구가 감소함에 따라 고온의 화염 영역이 배플 쪽으로 이동하고 있다. 화염크기의 감소는 연소실 크기를 작게 할 수 있다는 장점이 있지만, 배플면의 열손상과 불안정한 화염구조의 발생등에 대하여 정교한 연소모델을 이용한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

마이크로 연소기에서 연소특성은 난류 유동구조의 변화뿐만 아니라 연소실 벽면에서의 열손실에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 형상조건의 변화와 열손실 및 벽면 열전달의 상관성을 살펴보는 것이 주목적이다. 따라서 현재의 해석 조건에서 온도의 절대값은 큰 의미가 없고, 열손실에 관계된 열전달은 벽면온도구배와 밀접한 관련이 있다. 벽면에서의 온도구배를 자세히 살펴보기 위해, 재순환유동의 발달과 밀접한 관련이 있는 $x/D_f=2, 4$ 인 지점의 반경방향 온도분포 변화를 Fig. 12에 비교하였다. 전체 열유동장의

Fig. 13 Wall temperature distribution at $x/D_f=2, 4$ for $DR<1$ and $DR>1$.

변화를 살펴보면, $x/D_f=2$ 에서는 연료 및 공기유입구 주변으로 온도변화가 크게 나타나고 있다. 유동이 하류영역으로 발달함에 따라 열유동장은 유동의 확산에 의해 반경방향으로 발달하게 된다. 그렇지만, 벽면에서 온도분포는 형상변화에 따라 전혀 다른 경향성을 보이고 있다. 이는 벽면에서 온도구배를 비교한 Fig. 13을 보면 명확해진다. $DR=1$ 을 기준으로 $DR<1$ 인 경우는 연료유입구의 직경이 감소함에 따라 벽면에서 온도구배가 감소하고 있고, $DR>1$ 의 경우는 공기유입구의 직경이 감소함에 따라 벽면에서의 온도구배가 오히려 더욱 증가하고 있다. 이와 같은 벽면에서의 온도구배 변화는 Fig. 11~12에서 살펴본 화염크기 및 열유동장의 변화를 잘 반영하는 결과임을 확인할 수 있다.

벽면 온도구배의 증가는 상대적으로 더욱 큰 열손실이 발생하는 것을 의미하기 때문에 이러한 열손실의 변화를 정량적으로 파악하기 위해 Fig. 14에서 전체 유동장에 대해 무차원화한 연소실 평균온도(T/T_{ref})와 열손실율($q_w/q_{w,ref}$)

Fig. 14 Volume-averaged combustion temperature and heat loss for all cases.

변화를 살펴보았다. 여기서 T_{ref} 와 $q_{w,ref}$ 는 기준이 되는 $DR=1$ 의 연소실 평균온도와 열유속이다. 연소실 평균온도는 $DR<1$ 의 경우 $DR=1$ 보다 낮게 유지되고, 벽면온도 구배에 큰 영향을 받는 열손실도 연료유입구의 직경이 감소할수록 작게 나타나고 있다. 반대로, $DR>1$ 의 경우는 공기유입구의 직경이 감소함에 따라 벽면 평균온도와 열손실이 모두 증가하고 있다.

배플 형상변화에 따른 연소효율을 살펴보기 위해 Fig. 15에 배플 이후 영역에 대하여 전체 평균을 취한 CH_4 와 CO_2 의 질량분율을 나타내었다. 전체적으로 CH_4 의 양이 감소함에 따라 CO_2 의 양은 증가하는 일반적인 경향성을 보여주고 있다. CH_4 의 경우 DR 이 감소하거나 증가함에 따라 연소기내의 잔류량은 감소하지만, 그 변화 폭은 공기유입구의 직경이 감소하는 경우가 더욱 크게 나타나고 있다. 따라서 $DR \neq 1$ 인 경우 연소효율은 증가하지만 연소기 설계에서는 화염의 안정성, 열손실들을 종합적으로 고려해야 할 것으로 생각된다. 결과적으로 Fig. 14와 Fig. 15를 통해 $DR<1$ 의 경우는 $DR=1$ 에 비해 연소효율은 증가하지만 연소온도와 열손실은 감소하고, $DR>1$ 의 경우는 $DR \leq 1$ 에 비해 연소효율과 연소온도 및 열손실이 모두 증가함을 확인할 수 있다. $DR \leq 1$ 에 비해 $DR>1$ 인 경우가 연소기 내부의 온도가 높게 유지되기 장점이 있지만, 벽면에서 열손실이 증가하기 때문에 실제 마이크로 연소기의 설계시 다른 설계 인자들을 종합적으로 판단해야 할 것으로 생각된다.

Fig. 15 Volume-averaged mass fraction of CH_4 and CO_2 for all case.

4. 결 론

배플이 부착된 마이크로 연소기에서 배플형상 변화에 따른 난류유동 및 연소특성 변화에 대하여 고찰하였다. 형상변화와 상관없이 벽면 쪽으로 강한 재순환 유동이 발생하였고, 공기유입구의 직경이 감소하는 경우 $DR=1.33$ 을 제외하고 $x/D_f=2\sim6$ 인 하류영역의 중심에서 재순환 유동이 발생되었다. 형상변화에 따른 혼합특성은 재순환 영역의 발달과 변화에 따라 크게 좌우됨을 확인하였다. 혼합을 증가시키기 위해서는 연료유입구의 형상을 변화시키는 경우보다 공기유입구의 형상을 변화시키는 것이 더 바람직할 것으로 생각할 수 있다.

연소특성변화의 경우 직경비가 감소하거나 증가함에 따라 화염크기가 감소하였고, $DR<1$ 에 비해 $DR>1$ 인 경우가 더욱 크게 변화하였다. 직경비가 동일한 경우를 기준으로, 선택된 모든 경우에서 연소효율은 증가하였다. 연료유입구의 직경이 감소함에 따라 연소온도와 열손실은 감소하는 반면, 공기유입구의 직경이 감소함에 따른 연소온도와 열손실은 증가하였다.

결과적으로 공기유입구 직경이 감소하는 경우가 연료유입구의 직경이 감소하는 경우에 비해 유체간의 혼합과 연소효율 및 연소온도를 증가시키기 때문에 실제 연소기의 적용에 있어서 공기유입구의 형상을 변화시키는 것이 더 우수한 성능을 보여줄 것으로 생각된다. 그렇지만, 벽면에서 열손실은 연료유입구가 감소하는 경우에 비해 크게 증가하기 때문에 설계시 적절한 고려가 필요할 것으로 생각된다.

References

1. Jejurkar, S.Y. and Mishra, D.P., "A Review of Recent Patents on Micro-Combustion and Applications," *Recent Patents on Engineering*, Vol. 3, pp. 194-209, 2009.
2. Chou, S.K., Yang, W.M., Chua, K.J., Li, J. and Zhang, K.L., "Development of Micro Power Generators-A Review," *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 1-16, 2011.
3. Choi, H.S., Park, T.S. and Suzuki, K., "Turbulent Mixing of A Passive Scalar in Confined Multiple Jet Flows of A Micro Combustor," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 4276-4286, 2008.
4. Choi, H.S. and Park, T.S., "A Numerical Study for Heat Transfer Characteristics of a Micro Combustor by Large Eddy Simulation," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 56, pp. 230-245, 2009.
5. Choi, H.S., Nakabe, K., Suzuki, K. and Katsumoto, Y., "An Experimental Investigation of Mixing and Combustion Characteristics on The Can Type Micro Combustor with a Multi-Jet Baffle Plate," *Fluid Mechanics and Its Application*, Vol. 70, pp. 367-375, 2001.
6. Choi, H.S., Park, T.S. and Suzuki, K., "Numerical Analysis on The Mixing of A Passive Scalar in The Turbulent Flow of A Small Combustor by Using Large Eddy Simulation," *Journal of Computational Fluid Engineering (Korean)*, Vol. 11, pp. 67 - 74, 2006.
7. Woodfield, P.L., Nakabe, K. and Suzuki, L., "Numerical Study for Enhancement of Laminar Flow Mixing Using Multiple Confined Jet in A Micro-Can Combustor," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2655-2663, 2003.
8. ANSYS Fluent 6.3
9. Park, T.S. and Chung, Y.M., "Turbulent Flow and Scalar Mixing of A Coaxial Injector Having Two Fluid Jets," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 60, Issue 3, pp. 197-211, 2011.