

마이크로 사이클론 연소기의 화염 안정화 기구

오창보* · 최병일** · 한용식** · 김명배** · 황철홍***

Flame Stabilization Mechanism of a Micro Cyclone Combustor

Chang Bo Oh, Byung-il Choi, Yong-shik Han, Myung-bae Kim and Cheol-hong Hwang

ABSTRACT

A micro cyclone combustor was developed to be used as a component of mobile power generator (MPG). The cyclone combustor was designed so that fuel and air were supplied to the combustion chamber separately to prevent a flash-back. The flame shape stabilized inside the micro cyclone combustor was visualized experimentally and the flow field and the combustion characteristics of the combustor were investigated numerically. The global equivalence ratio (Φ), defined using the fuel and air flow rates, was introduced to examine the overall flow and flame features of the combustor. The flame stabilization mechanism could be well understood using the velocity distribution inside the combustor. For only non-reacting case, it was found that a weak recirculating zone was formed upper the fuel-supplying tube in case of $\Phi < 1.0$. It was also found that small regions that have a negative axial velocity exist near the fuel injection ports for both of non-reacting and reacting case. It was identify that a flame front was stabilized at the negative axial velocity regions near the fuel injection ports.

Key Words : Micro combustor, Mobile power generator, Flame stability, Numerical simulation

1. 서 론

최근 연료전지의 개질기나 초소형 동력발생 장치의 핵심부품으로서 마이크로 연소장치 개발에 관심이 커지고 있다.[1] 마이크로 연소기를 개발함에 있어서 해결해야 할 기술 중의 하나는 작은 공간 내에서 안정된 연소를 이루는 것이다. 연소기의 크기가 줄어들게 되면 연소기내 유동 체류 시간이 줄고, 연소기 체적대비 표면적의 비가 커지게 되어 벽면을 통한 열손실이 증가하여 안정된 화염을 유지하기가 어려워지게 된다. 최근에 미소공간 내에서 화염을 안정화시키기 위해서 여러 가지 기술이 적용되어 시도되고 있다. 대표적인 마이크로 연소기술로는 미소공간 내에서 촉매를 이용한 연소법을 들 수 있으며, 열재순환을

이용하여 혼합기의 온도를 상승시켜 화염 안정화를 이루는 방법과 이들 두 기술의 조합이 현재까지 많이 연구되어 온 대표적인 기술로 볼 수 있다.[2-4]

그 외에도 통상의 연소기술을 마이크로 시스템에 적용한 기술로서 선회유동 혹은 볼텍스 유동을 형성시켜 화염을 안정화 시키려는 시도들이 이루어지고 있다[5,6].

아직까지 마이크로 연소기와 관련된 기술들은 가능성 타진을 위한 기초연구 단계에 있는 것들이 대부분이다. 또한, 현재 개발되고 있는 마이크로 연소기들은 해결해야 할 어려운 점들을 많이 남아 있는 상태라서 향후 지속적인 연구가 필요하다.

기존의 마이크로 연소기 성능 향상뿐만 아니라 새로운 형태의 마이크로 연소기를 제작하기 위해서 미소공간 내의 연소현상에 관한 기초연구도 새로이 시도되고 있다. 이미 열손실 및 열재순환이 화염 안정화에 미치는 영향에 대해서는 많은 검토가 이루어지고 있다.[1] 또한, 미소채널 내의

* 한국기계연구원, 에너지기계연구센터

** 한국기계연구원, 에너지기계연구센터

*** 인하대학교, 기계공학부

† 연락처자. cboh@kimm.re.kr

촉매 연소특성에 대한 연구, 고압 조건하에서 화염 안정화 특성, 미소채널 혹은 튜브 내의 화염 전파 및 안정화 특성에 관한 연구도 진행되고 있다[7-10]. 초소형 제트화염의 연소 특성을 고찰하는 것[11]도 이러한 범주의 연구에 속한다고 볼 수 있다.

이렇듯 아직까지 마이크로 연소기 관련 기술은 관련 기초이론들을 정립하는 단계이며, 연소기 제작과 관련해서도 좀 더 새로운 시도가 많이 필요한 단계에 있다. 따라서, 기존의 마이크로 연소기 외에도 좀 더 다양한 연소기에 대한 검토가 이루어지는 것이 마이크로 연소기의 개발에 도움이 될 것으로 생각된다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 통상의 연소기에 많이 사용되고 있는 사이클론 연소기법을 도입한 마이크로 연소기를 제작하였다. 제작된 연소기 내부에서 안정된 연소를 시키기 위해서는 화염 안정화와 관련된 마이크로 연소기의 연소장에 대한 정보를 얻는 것이 중요하다. 특히, 연소기 스케일이 작을 경우에는 실험적 접근이 제한적인 경우가 많아 수치적으로 고찰하는 것이 매우 유의할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 제작된 마이크로 사이클론 연소기의 연소특성을 고찰하기 위해 수치계산을 수행하였다. 비반응 및 반응 유동시의 연소기 내부의 유속분포를 통해 화염 안정화 기구를 검토하였으며, 온도분포와 화학종 농도분포를 통해 사이클론 연소기의 연소특성에 대해 검토하였다.

2. 연소기 제작 및 화염 가시화

2.1 연소기 제작

본 연구에서는 33W급 연소기를 목표로 하여 Fig. 1에 보이는 것과 같은 매우 작은 스케일의 초기모델 연소기를 제작하였다. 이는 본 연구에서 사용한 CH_4 연료의 발열량을 기준으로 유량이 52 sccm를 연소시킬 수 있는 정도에 해당된다. 연소기의 외부 사각기둥 치수는 $9\text{mm} \times 9\text{mm} \times 32\text{mm}$ 이고, 내부 연소실 직경은 7mm이다. 연료 및 공기 공급관의 내경과 외경은 각각 1.6mm와 3.2mm이다. 연소기, 연료 및 공기 공급관은 스테인레스 스틸로 제작되었다. 공기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 연소실 내부 원주방향에 접선이 되도록 공기를 공급되며 연료는 연료 공급관을 통하여 공급된 후 연소실 내부에서 2개의 연료분사 포트를 통하여 공기흐름에 수직방향으로 분사된다. 연료 공급관의 끝단은 막혀 있어 bluff-body와 유사한 역할을 할 수 있도록 제작되어 있으며, 2개의 연료분사 포트의 직경은 각각 0.5mm 정도로서 레이저 가공을 통하여 만들어 졌다. 연료분사 포트의 위치는 연소실 바닥에

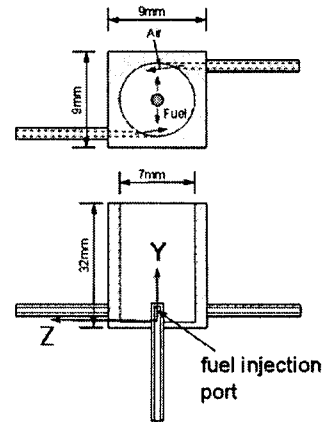


Fig. 1 Schematic and dimension of the micro cyclone combustor

서부터 1.55mm 상부에 위치하도록 하였다. Fig. 2는 제작된 마이크로 사이클론 연소기의 사진을 보여주고 있다.

2.2 화염 가시화 실험

마이크로 사이클론 연소기 내부에 안정화된 화염 형상을 가시화하기 위해서 일반적인 디지털 카메라에 접사렌즈를 이용하였다. 제작된 연소기의 화염을 측면에서 가시화하는 것은 불가능하기 때문에 측면 화염형상 가시화를 위하여 연소기 내부 가시화가 가능한, 투명한 석영 연소기를 제작하였다. 석영 연소기는 원통형의 석영관에 공기 공급관을 부착하여 제작하였다. 석영 연소기의 아래 부분은 상부 출구와 마찬가지로 원형으로 개방되도록 제작하여 스테인레스 평판에 부착, 고정시켰다. 연료 공급관은 연소기에 직접 연결될 필요가 없으므로 스테인레스 관을 이용하여 연료 공급포트까지 정밀하게 제작되었으며, 하부의 스테인레스 평판에 고정되면서 연소기 내부로 들어가도록 제작되었다. 석영으로 제작된 연소기의 내경과 공기 공급관 내경은 원래의 연소기의

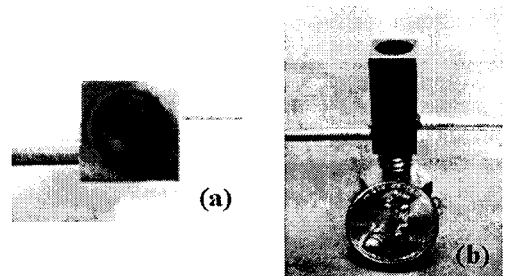


Fig. 2 Photos of the micro cyclone combustor

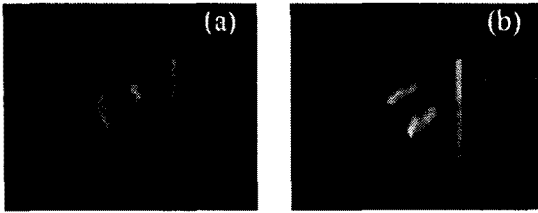


Fig. 3 Photos of the flame shape stabilized inside the micro cyclone combustor, (a) $\Phi = 0.7$, (b) $\Phi = 1.0$ ($Q_f = 52$ sccm).

치수와 거의 동일하도록 제작하였다.

3. 수치계산 방법

3.1 격자계 구성

본 연구의 수치계산에는 상용코드를 이용하였다. 계산에 앞서 필요한 격자는 ICEMCFD v-10 [12]을 이용하여 생성하였다. 격자계는 330,000개의 6면체(hexahedral), 비정렬 격자들(unstructured grid)이 연소실 바닥의 중심에 원점을 두고 x, y, z 세 축으로 구성된 직교 좌표계 상에서 구성되도록 하였다. 좌표축 y는 연소실 내부 중심축과 일치하며, 좌표축 y, z는 중심축 y에 수직인 두 축에 해당된다. 연소기의 치수와 일치하도록 격자계를 구성하였으며, 격자는 연소실 내부와 연료 및 공기공급관 내부에만 위치하도록 배열되었다.

3.2 계산방법 및 경계조건

수치계산에는 FLUENT 6.0[13]이 이용되었다. 본 연구에서는 예혼합화염이 가지고 있는 역화(Flash-back) 특성을 배제하기 위해서 연료와 공기를 별도로 연소실로 공급되는 방식을 채택하였다. 연소조건을 정량화하기 위해서 공급되는 연료 및 공기유량을 이용하여 총괄 당량비(Φ)를 정의하였다. 고려된 총괄 당량비의 조건 내에서는 전체 연소실 내 연료 및 공기의 총유량에서 계산된 총괄 유속과 연소실 내경을 기준으로 한 Re 수는 23~36 정도가 되므로 다루는 유동조건은 층류영역에 해당된다. 따라서, 계산에서는 정상상태 연소장 해석에 필요한 방정식들이 이용되었으며, 최종적으로 정상상태의 해를 구하였다. 반응조건에 대한 계산에서 화학반응을 위해서는 2단계 총괄 반응기구[14]를 이용하였다.

압력-속도의 교정은 SIMPLE법[15]을 이용하였으며, 정상상태는 해의 잔여 오차(residual) 값이 1.0×10^{-4} 이하가 되는 시점을 기준으로 하였다.

경계조건으로 연소실 내부 벽면과 연료 및 공기 공급관 내부 벽면에서의 유속에 대해서는

No-slip 조건을 주었으며, 다른 물리량에 대해서는 구배가 없도록 경계조건을 처리하였다. 각 총괄 당량비 조건에 대해 연료유량(Q_f)은 52 sccm으로 고정하였으며, 공기유량(Q_{air})은 총괄 당량비에 상응하도록 정해진 후 2개의 공급관에 균등 분할되어 유입되도록 하였다. 계산시간은 비반응 및 반응조건에 대해서 Pentium-IV 3.0 GHz PC에서 각각 5시간 및 30시간 정도가 소요되었다.

4. 결과 및 검토

Fig. 3은 마이크로 사이클론 연소기의 내부 화염형상을 연소기 상부에서 가시화한 것이다. 총괄 당량비가 과농인 상태에서 연소를 할 경우에는 연소기 내부에서 연료가 완전 연소되지 않고 버려지게 되어 연소효율 측면에서 연료를 충분히 활용하지 못하게 된다. 따라서, 본 연구에서 관심을 갖는 조건은 $\Phi < 1.0$ 인 영역이며, Fig. 3에는 $\Phi = 0.7$ 과 1.0인 조건에 대한 화염형상만 가시화하

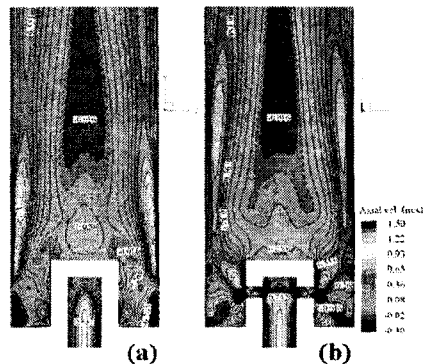


Fig. 4 Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) y-z plane, (b) x-y plane (non-reacting, $\Phi = 0.7$).

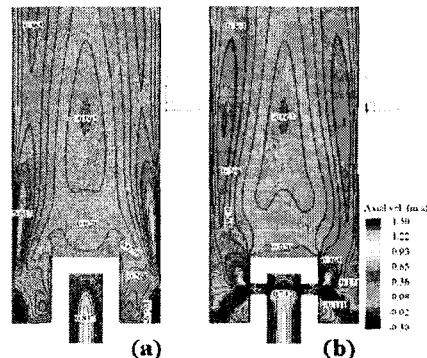


Fig. 5 Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) y-z plane, (b) x-y plane (non-reacting, $\Phi = 1.0$).

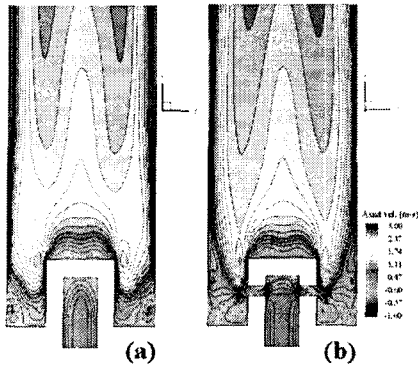


Fig. 6 Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) y-z plane, (b) x-y plane (reacting, $\Phi=0.7$).

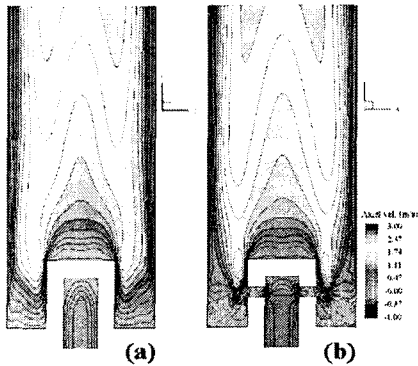


Fig. 7 Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) y-z plane, (b) x-y plane (reacting, $\Phi=1.0$).

였다. 그림의 결과는 Φ 에 따라 화염형상이 달라지고 있음을 잘 보여주고 있다. $\Phi=0.7$ 인 조건에서는 중심축 근처를 제외한 곳에 위치하면서 원주방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다. $\Phi=1.0$ 인 조건에서도 $\Phi=0.7$ 과 유사하지만 원주방향으로 화염이 이어져 있지 않고, 전체적으로 2개로 분리되어 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 화염형상은 Fig. 8, 9의 수치계산에서 얻어진 화염온도 분포를 통해서도 확인할 수 있다.

Fig. 4~7에는 수치계산으로 얻은 연소기 내부의 축방향 속도성분의 2D 분포를 도시하였다. Fig. 4, 5는 비반응의 경우에 대한 결과이고, Fig. 6, 7은 반응의 경우에 해당된다. 그림에서 점선은 축방향 유속이 음의 값을 갖고 있음을 의미한다. 축방향 속도성분은 연소기 내의 화염 안정화와 밀접한 관련이 있는 인자로서 검토해 보는 것은 화염 안정화 기구를 유추하는데 중요하다. 비반응 유동장 결과에서는 연료 공급관 윗면(bluff-body)보다 하류의 중심축 근처에서 음의 축방향 유속을 갖는 재순환 영역이 존재하고 있

음을 알 수 있다. 또한, 이 재순환 영역의 크기는 공기의 유속이 증가할수록 즉, Φ 가 작아질수록 점차 커지고 있음을 알 수 있다. 한가지 특이한 점은 연료포트의 출구 근처에서도 작은 음의 유속을 갖는 영역이 존재하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4~7에 보이는 결과는 유속성분의 2D 분포만 보여주고 있기 때문에 연료포트 출구 근처의 음의 유속을 갖는 영역이 곧 와동을 갖는 영역을 의미하지는 않는다. 결과를 도시하지는 않았지만 3차원 유선분포로부터 확인해 본 결과, 연료 공급관에서 출발한 유선은 연료포트 근처에서 공기류와 부딪히면서 상부(+유속) 및 하부(-유속) 등으로 골고루 퍼짐과 동시에 원주방향으로 나선을 이루어 연소기 출구방향으로 향하고 있음을 확인하였다.

Fig. 6, 7에 보이는 반응의 경우에 대한 결과에서는 Fig. 4, 5에 보였던 bluff-body 상부 중심축 근처의 재순환 영역은 존재하지 않음을 알 수 있다. 이는 상부에서부터 반응대가 존재하기 때문에 하류에서는 화염에 의한 고온 열팽창 효과에 의해 재순환 영역이 존재하지 못하고 연소기 출구방향으로 향하는 큰 유속성분만 존재하기 때문이다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 다루고 있는 정도의 스케일에서는 연소할 때 재순환 영역을 형성시키는 것은 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서, 통상의 사이클론이나, 선회연소기처럼 재순환 영역을 이용하여 화염을 안정화시키는 것은 어려운 것으로 판단된다. 그러나, Fig. 6, 7에서도 연료포트 출구 근처의 음의 유속성분을 갖는 영역은 그대로 존재하고 있어 이 영역이 화염 안정화에 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8~9에는 반응조건에 대해 수치계산으로 얻은 연소기 내부의 화염온도 분포를 보여주고 있다. 각 그림의 (a)는 화염의 3차원 형상을 보여 줄 수 있도록 일부 축방향 단면의 화염온도를 동시에 표현하였고, (b)와 (c)에는 2D 화염온도 분포를 도시한 것으로 직각이 되는 2개의 단면에 대한 결과를 보여주고 있다. Fig. 8과 9에서 총괄당량비 조건에 상관없이 화염은 연료포트 출구 근처에서부터 형성되어 하류로 이어져 있음을 알 수 있어 연료포트 출구 근처의 음의 유속을 갖는 영역이 화염 안정화와 밀접한 연관이 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8의 $\Phi=0.7$ 인 조건은 원주방향으로 공급되는 공기의 유량이 많기 때문에 화염은 $\Phi=1.0$ 보다 중심축 근처로 모여져 있다. 또한, 3D 결과에서 확인할 수 있듯이 비교적 온도가 균일한 화염대가 형성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 $\Phi=1.0$ 인 조건에서도 연료포트 출구 근처에서 화염이 형성되어 하류로 이어져 있는 형태는 $\Phi=0.7$

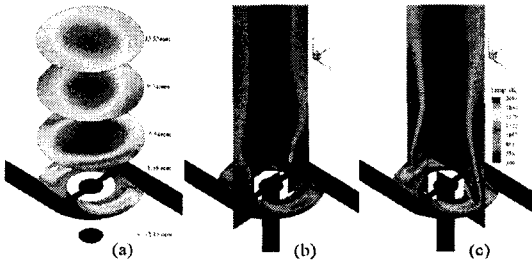


Fig. 8 Flame temperature distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z planes, $-2.54\text{mm} < y < 13.53\text{mm}$, (b) x-y plane, (c) y-z plane (reacting, $\Phi=0.7$).

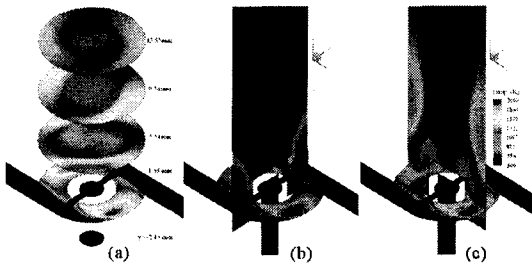


Fig. 9 Flame temperature distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z planes, $-2.54\text{mm} < y < 13.53\text{mm}$, (b) x-y plane, (c) y-z plane (reacting, $\Phi=1.0$).

과 유사하지만 $\Phi=0.7$ 보다는 고온 화염대가 좀 더 반경방향으로 바깥쪽까지 확장되어 있고 국부적으로 환형을 형성하는 고온영역들이 보인다. Fig. 8의 $\Phi=0.7$ 인 조건에서는 Fig. 3과 유사하게 비교적 균일한 화염대를 보이는 점과, Fig. 9의 $\Phi=1.0$ 인 조건에서 $1.55\text{mm} < y < 5.54\text{mm}$ 인 단면에서의 온도분포가 Fig. 3의 $\Phi=1.0$ 인 화염을 상부에서 가시화한 형상과 매우 유사한 것을 확인해 볼 때 수치계산은 실험결과를 정성적으로 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10~11에는 $\Phi=0.7, 1.0$ 조건에 대해 수치계산으로 얻어진 연료(CH_4) 및 산화제(O_2)의 농도분포를 각각 도시하였다. 이들 결과에서 연료의 농도는 연료포트 근처에서 물분율 1.0의 값을 갖다가 $y=5.54\text{mm}$ 인 단면에서 그 농도값이 매우 낮아지는 것으로 보아 연료포트 근처로부터 $y=5.54\text{mm}$ 이전의 상류에서 대부분 반응에 참여하여 생성물로 변환되는 것으로 판단된다. 그림에는 도시하지 않았지만 연료의 반응율도 연료포트에서 bluff-body 선단까지가 매우 높은 값을 갖는 것으로 확인된 점도 이를 뒷받침 해주고 있다. $\Phi=0.7$ 인 조건이 $\Phi=1.0$ 에 비해 하류로 진행하면서 연료농도가 더 빨리 낮아지는 것은 공기의 공급량이 많기 때문이다. 즉, $\Phi=0.7$ 조건은 Φ

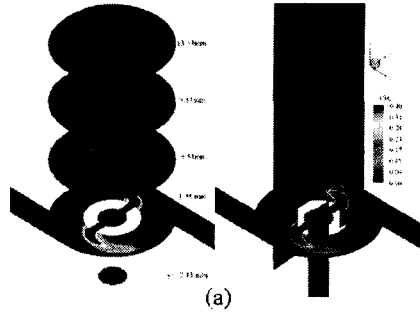


Fig. 10 Fuel and oxidizer distributions inside the micro cyclone combustor, (a) fuel (CH_4), (b) oxidizer (O_2), ($\Phi=0.7$).

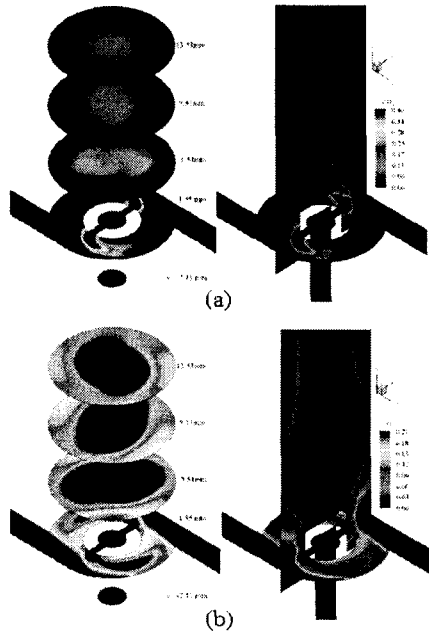


Fig. 11 Fuel and oxidizer distributions inside the micro cyclone combustor, (a) fuel (CH_4), (b) oxidizer (O_2), ($\Phi=1.0$).

$=1.0$ 보다 공기량이 많기 때문에 좀 더 좁은 상류의 영역내에서도 연소반응을 충분히 이룰 수 있다는 것을 의미하는 것으로 당연한 결과로 판단

된다.

$\Phi=0.7$ 과 1.0 조건의 연료 및 산화제의 분포를 통해 또 한가지 확인할 수 있는 점은 연료와 산화제가 공존하는 영역이 거의 없다는 점이다. 또한, Fig. 8, 9에서 확인한 고온 화염온도 위치를 기준으로 서로 나누어져 분포한다는 점으로 미루어 볼 때 본 사이클론 연소기 내부에서는 비예혼합 방식으로 연소가 이루어지고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

마이크로 사이클론 연소기의 비반응 및 반응조건에 대한 유동 및 연소특성을 고찰할 목적으로 상용코드를 이용한 수치계산 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

비반응 조건에서는 하류의 중심축 근처에서 약한 재순환 영역이 생긴다. 또한, 이 재순환 영역 크기는 공기유량이 커지는 회박조건으로 갈수록 더 넓어지는 것을 확인하였다. 그러나, 이 재순환 영역은 반응조건에서는 연소에 의한 고온 화염대의 열팽창에 의해 소멸되기 때문에 화염 안정화에는 영향을 미치지 못한다.

비반응 및 반응조건 모두 연료포트 출구 근처에서는 연료류가 공기류에 부딪히면서 생성된 음의 유속영역이 존재한다. 이 영역은 연료와 공기가 처음 만나서 혼합되는 영역으로서 이 근처에 화염선단이 위치하여 화염을 안정화되고 있음을 알 수 있었다.

반응조건에 대한 수치계산 결과에서 연료와 공기의 농도분포를 확인한 결과 본 마이크로 사이클론 연소기는 연료와 공기를 별도로 공급한 대로 비예혼합 연소방식으로 연료와 공기를 연소시키고 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 2007년도 기본연구사업 지원에 의해서 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Fernandez-Pello, A. C., "Micro-power generation using combustion : Issues and approaches," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 883-899, 2002.
 [2] Suzuki, Y., Hori Y. and Kasagi, N., "Micro catalytic combustor with tailored Pt/Al₂O₃ films," *PowerMEMS 2003*, pp. 23-26, 2003.

[3] N. I. Kim, S. K. Kato, T. Kataoka, T. Yokomori, S. Maruyama, T. Fujimori and K. Maruta, "Flame stabilization and emission of small swiss-roll combustors as hetero," *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 229-240, 2005.
 [4] Ahn, J., Eastwood, C., Sitzki, L. and Ronney, P. D., "Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 2463-2472, 2005.
 [5] Wu, M., Wang, Y., Yang, V. and Yetter, R. A., "Combustion in meso-scale vortex combustor," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 3235-3242, 2007.
 [6] Yuasa, S., Oshimi, K. and Uehara, M., "Concepts and Combustion Characteristics of an Ultra-micro and a Micro Combustor," *Proc. Int. Gas Turbine Cong. 2003*, Tokyo, November 2-7, 2003.
 [7] Norton, D. G. and Vlachos, D. G., "A CFD study of propane/air microflame stability," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 97-107, 2004.
 [8] Suzuki, Y., Hori Y. and Kasagi, N., "Micro catalytic combustor with tailored Pt/Al₂O₃ films," *PowerMEMS 2003*, pp. 23-26, 2003.
 [9] Norton, D. G. and Vlachos, D. G., "A CFD study of propane/air microflame stability," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 97-107, 2004.
 [10] Kim, N. I., Kataoka, T., Maruyama, S and Maruta, K., "Flammable Limits of Stationary Flames in Tubes at Low Pressure," *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 78-88, 2005.
 [11] Cheng, T. S., Chao, Y.-C., Wu, C.-Y., Li, Y.-H., Nakamura, Y., Lee, K.-Y., Yuan, T. and Leu, T. S., "Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 2489-2497, 2005.
 [12] ICEM CFD Engineering, ICEM-CFD Tutorial Manual: Meshing Modules, version 10.0, 2005.
 [13] FLUENT, FLUENT 6.0 User guide, Lebanon, N. H., 2002.
 [14] Dupont, V., Pourkashanian, M. and William, A., "Modeling of Process Heaters Fired by Natural Gas," *J. Indust. Energy*, Vol. 66, pp. 20-28, 1993.
 [15] Patankar, S. V., "Numerical heat transfer and fluid flow," McGraw-hill, 1980.