

마이크로 사이클론 연소기의 혼합 및 유동특성에 관한 수치해석 연구

오창보[†] · 최병일* · 한용식* · 김명배* · 황철홍**

Numerical Simulation of the Mixing and Flow Characteristics in a Micro Cyclone Combustor

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

Key Words : Micro Combustor(마이크로 연소기), Numerical Simulation(수치해석), Recirculating Zone(재순환 영역)

Abstract

A micro cyclone combustor was developed to be used as a heat source of thermoelectric power generator (TPG). The cyclone combustor was designed so that fuel and air were supplied to the combustion chamber separately. The mixing and flow characteristics in the combustor were investigated numerically. The global equivalence ratio (Φ), defined using the fuel and air flow rates, was introduced to examine the flow features of the combustor. The mixing of fuel and air inside the combustor could be well understood using the fuel concentration distribution. It was found that the weak recirculating zone was formed upper the fuel-supplying tube in case of $\Phi < 1.0$. In addition, it was found that small regions that have a negative axial velocity exist near the fuel injection ports. It is assumed that these negative axial velocity regions can stabilize a flame inside the micro cyclone combustor.

1. 서 론

마이크로 연소장치는 연료전지의 개질기나 마이크로 동력발생 장치의 핵심부품으로서 그 필요성이 증가되고 있어 최근 마이크로 연소기의 제작과 관련된 일련의 연구들이 이루어지고 있다⁽¹⁾. 마이크로 연소기를 개발함에 있어서 해결해야 할 기술 중의 하나는 작은 공간내에서 안정된 연소를 이루는 것이다. 연소기의 크기를 매우 작게 제작하게 되면 연소기내 혼합기의 체류시간이 줄고, 벽면을 통한 열손실이 증가하게 되어 안정된 화염을 유지하기가 매우 어려워지게

된다.

현재까지 미소공간 내에서 화염을 안정화시키기 위해서 여러 가지 기술이 접목되어 시도되고 있다. 작은 스케일에서의 대표적인 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 연소기술로 볼 수 있다⁽²⁻⁴⁾. 그 외에도 통상의 연소기술을 매우 작은 스케일의 연소 시스템에 적용한 기술로서 선회유동 혹은 볼텍스 유동을 형성시켜 화염을 안정화 시키려는 시도들이 이루어 지고 있다⁽⁵⁾.

아직까지 마이크로 연소기에 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.

[†] 회원, 한국기계연구원, 에너지기계연구센터

E-mail : cboh@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7929 FAX : (042)868-7355

* 한국기계연구원, 에너지기계연구센터

** 인하대학교, 기계공학부

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 있으며⁽⁴⁾, 연소기 재료의 물성과 연소기의 기하학적 형상이 화염에 미치는 영향 등에 대해서도 일부 연구가 이루어지고 있다⁽⁶⁾. 또한, 매우 작은 스케일 내의 촉매 연소특성에 대한 연구, 고압 조건하에서 화염 안정화 특성, 마이크로 채널 혹은 튜브 내의 화염 전파 및 안정화 특성에 관한 연구도 진행되고 있다⁽⁷⁾. 마이크로 튜브에서 연료가 분출되어 형성된 제트화염의 연소특성을 고찰하는 것도 이러한 범주의 연구⁽⁸⁾에 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. 이러한 형태의 연소기들은 연소기 내부의 혼합과 유동특성이 화염 안정화에 큰 영향을 주기 때문에 연소기 내부 유동장에 대한 정보를 얻는 것이 매우 중요하다. 연소기의 스케일이 작아지게 되면 실험적으로 연소기 내부 국소정보까지 자세히 얻는 것은 제약을 받는 경우가 많아지기 때문에 수치계산 연구가 더욱 중요해지게 된다.

본 연구에서는 연소실험에 앞서, 제작된 마이크로 연소기의 연료-공기 혼합특성 및 유동장 정보를 얻기 위해 수치계산을 수행하였다. 연료의 분포를 통해 연소기 내부의 연료-공기 혼합특성을 고찰하였으며, 축방향 유속분포를 이용하여 제작된 마이크로 연소기 내부의 유동구조에 대해서도 검토하였다.

2. 마이크로 사이클론 연소기 설계

본 연구의 궁극적 목적은 연소열과 열전소자를 이용하여 1W 급 전기를 생산하는 마이크로 동력 발생장치(micro power generator; MPG)를 개발하는 것이다. MPG 에 열을 안정적으로 공급하기 위해서

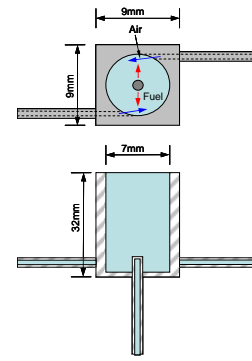


Fig. 1. Schematic and dimension of the micro cyclone combustor.

는 우선 화염 안정성이 우수한 마이크로 연소기를 제작할 필요가 있다. 현재까지 개발되고 있는 열전소자는 10%가 넘는 전기변환 효율을 갖는 것들도 일부 있으나⁽⁹⁾, 상업용으로 판매되고 있는 열전소자의 효율은 대략 3~6% 정도로 매우 낮다. 연소기와 열전소자를 이용한 TPG의 전체 시스템 효율은 연소효율과 열전소자 효율에 주로 지배된다. 만약 개발할 TPG 전체 시스템의 열효율을 4% 정도로 가정한다면, 연소기의 출력은 25W가 되어야 하며, 연소효율을 고려한다면 유입되는 연료의 발열량을 기준으로 30W 급 정도의 연소기가 필요하게 된다.

이에 본 연구에서는 33W 급 연소기를 목표로 하여 Fig. 1에 보이는 것과 같은 매우 작은 스케일의 마이크로 연소기를 제작하였다. 이는 CH₄를 연료로 사용하는 경우 발열량을 기준으로 연료유량이 52 sccm을 연소시킬 수 있는 정도에 해당된다. 연소기의 외부 사각기둥 치수는 9mm × 9mm × 32mm이고, 내부 연소실 직경은 7mm이다. 연료 및 공기 공급관의 내경과 외경은 각각 1.6mm와 3.2mm이다. 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

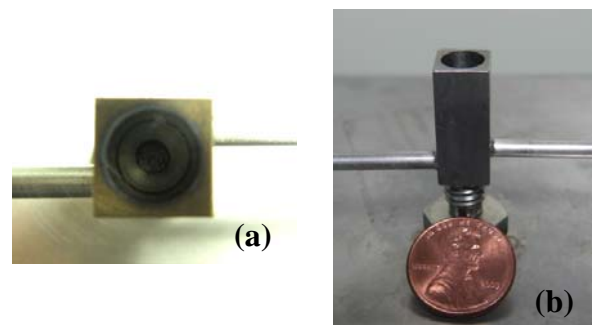


Fig. 2. Photos of the micro cyclone combustor.

3. 수치계산 방법

본 연구에서는 마이크로 사이클론 연소기 내의 혼합 및 유동특성에 대한 수치계산을 수행하기 위하여 상용코드인 FLUENT 6.0⁽¹⁰⁾을 이용하였다. 수치계산에 필요한 격자는 ICEMCFD v-10.0⁽¹¹⁾을 이용하여 생성하였다. 격자계는 330,000 개의 6 면체(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.

본 연구에서는 연료는 CH₄를 이용하였다. 연료는 공기와는 별도로 공급되어 연소실 내부에서 혼합되지만, 정량적 고찰을 용이하게 하기 위하여 공급되는 연료량 및 공기량을 이용하여 총괄 당량비(Φ)를 정의하였다. 고려된 총괄 당량비의 조건 내에서는 전체 연소실 내 연료 및 공기의 총유량에서 계산된 총괄유속과 연소실 내경을 기준으로 한 Re 수는 23~36 정도에 해당된다. 또한, 공기유속과 공기 공급관 내경을 기준으로 할 경우에도 48~79 정도가 되므로 다루는 유동조건은 층류영역에 해당된다. 따라서, 계산에서는 층류유동에 대한 정상상태의 해를 구하였다.

압력-속도의 교정은 SIMPLE 법⁽¹²⁾을 이용하였으며, 정상상태는 해의 잔여 오차(residual) 값이 1.0×10^{-4} 이하가 되는 시점을 기준으로 하였다.

연소실 내부 벽면과 연료 및 공기 공급관 내부 벽면에서 유동은 No-slip 조건을 주었으며, 다른 물리량에 대해서는 구배가 없도록 경계조건을 처리하였다. 계산시간은 각 유동조건에 대해서 Pentium-IV 3.0 GHz 에서 5 시간 정도가 소요되었다.

4. 결과 및 검토

4.1 혼합특성

Fig. 3~5에는 연소기 내부의 연료-공기 혼합특성을 고찰하기 위해 각 총괄 당량비 조건에 대해 연료인 CH₄의 3D, 및 2D 분포를 도시하였다. 그림에서 (b)와 (c)는 수직인 두개의 단면에 대한 결과를 나타내며, 각 그림에서 빨간색 실선은 이론혼합비의 위치를 나타낸다. 공기의 성분인 산소나 질소의 농도분포를 별도로 도시하지는 않았지만

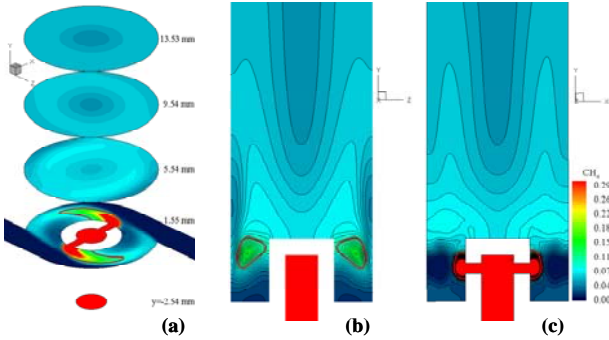


Fig. 3. Fuel concentration distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z plane, (b) y-z plane, (c) x-y plane ($\Phi = 0.7$).

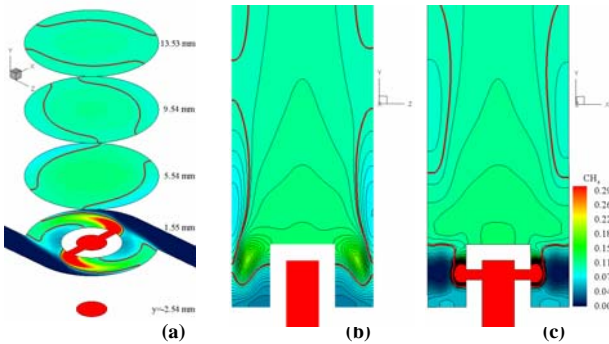


Fig. 4. Fuel concentration distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z plane, (b) y-z plane, (c) x-y plane ($\Phi = 1.0$).

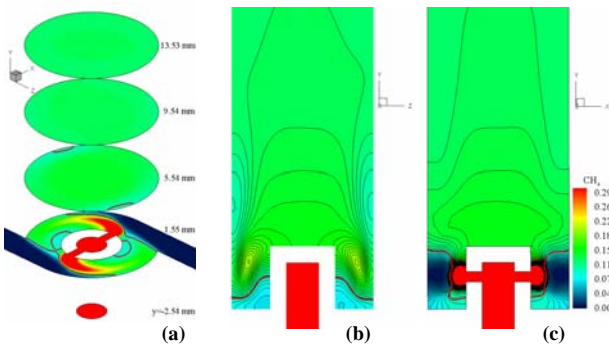


Fig. 5. Fuel concentration distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z plane, (b) y-z plane, (c) x-y plane ($\Phi = 1.3$).

끝단은 막혀 있어 bluff-body 와 유사한 형태로 제작되어 있으며, 2 개의 연료분사 포트의 직경은 각각 1mm 정도로서 레이저 가공을 통하여 만들어 졌다. 연료분사 포트의 위치는 연소실 바닥에서부터 1.55mm 상부에 위치하도록 하였다. Fig. 2는 제작된 마이크로 사이클론 연소기의 사진을 보여주고 있다.

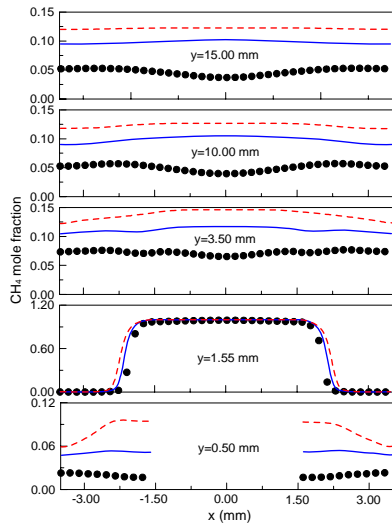


Fig. 6. Fuel concentration profiles at the selected locations inside of the micro cyclone combustor (\bullet : $\Phi = 0.7$, $—$: $\Phi = 1.0$, $- - -$: $\Phi = 1.3$).

이들 화학종의 농도분포는 연료의 분포와는 반대의 경향을 보인다.

참고로, 연소기 내부의 연료-혼합에 지배적인 인자를 고찰하기 위해서 Table 1 에서 보는 바와 같이 각 조건에서의 연료의 확산시간(t_D)과 대류시간(t_C)을 비교하였다. 여기서, V_m 은 각 조건의 연료와 공기의 총유량으로부터 계산된 총괄유속을 의미한다. Table 1의 결과로부터 모든 조건에서 t_D 가 t_C 보다 충분히 큰 것을 알 수 있다. 이것은 각 조건에서 연소기 내부의 혼합은 전체적으로 확산혼합에 의해 지배되는 않음을 보여주는 것이며, 이는 본 연구에서 다루고 있는 연소기의 크기가 실제로 마이크로 스케일을 갖지는 않기 때문이다. 결국, 본 연구의 연소기 내부의 연료-공기의 혼합은 유동구조 및 총괄 당량비와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 특히, 그림으로 도시하지는 않았지만 연소기 내부의 유선분포는 공급된 연료와 공기가 연소기 외부로 바로 유출되지 않고 원주방향으로 선회하면서 형식으로 혼합이 잘 촉진 되도록 형성되어 있는 것을 확인하였다.

연소기 내부의 전체적인 연료 공간분포를 통해

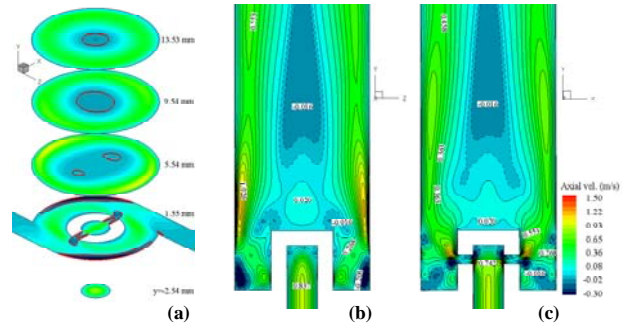


Fig. 7. Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z plane, (b) y-z plane, (c) x-y plane ($\Phi = 0.7$).

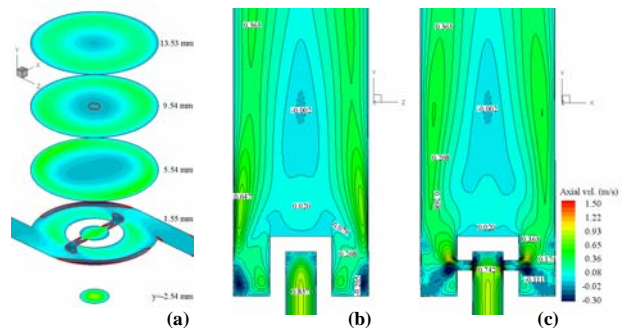


Fig. 8. Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z plane, (b) y-z plane, (c) x-y plane ($\Phi = 1.0$).

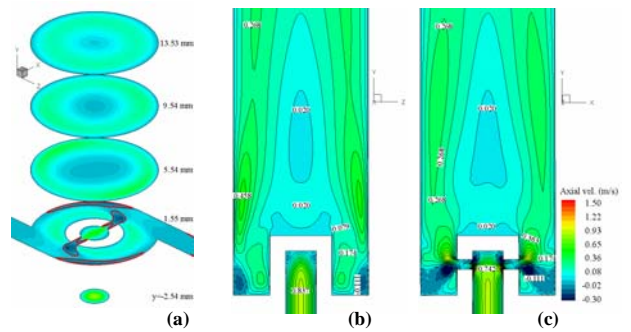


Fig. 9. Axial velocity distributions inside the micro cyclone combustor, (a) x-z plane, (b) y-z plane, (c) x-y plane ($\Phi = 1.3$).

모든 조건에서 연료포트 근처에서는 연료가 공급되기 때문에 연료의 농도가 높지만 연소기 하류에서는 충분히 연료-공기의 혼합이 이루어지고 있

Table 1 Characteristic time scales related to the fuel and air mixing.

	t_D	t_C ($\Phi=0.7$)	t_C ($\Phi=1.0$)	t_C ($\Phi=1.3$)
Equation	$A(\sim\pi r^2)/D$	L/V_m		
	$A=3.85\times 10^{-5} \text{ m}^2$ $D_{\text{CH}_4\text{-air}}=1.06\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$L=32 \text{ mm}$ $V_m=0.082 \text{ m/s}$	$L=32 \text{ mm}$ $V_m=0.059 \text{ m/s}$	$L=32 \text{ mm}$ $V_m=0.053 \text{ m/s}$
Characteristic time scales (s)	3.63	0.39	0.54	0.61

음을 알 수 있다. 총괄 당량비를 이용하여 연료와 공기가 완전히 혼합되었다고 가정했을 경우의 연료 물분율은 $\Phi=0.7, 1.0, 1.3$ 에 대해서 각각 0.068, 0.095, 0.120 가 된다. 하류 영역에서는 각 총괄 당량비에서 완전 혼합으로 가정했을 경우의 연료농도와 유사한 값을 보이고 있어 연료와 공기가 충분히 잘 혼합되고 있다는 것을 다시 한번 확인할 수 있다. 특이하게 $\Phi=0.7$ 인 조건에서 하류의 중심축에서 연료의 농도가 낮은 것은 하류 중심축 근처의 재순환 유동에 의해서 공기가 미소량 유입이 되었기 때문이다. 각 총괄 당량비별 전체적인 혼합특성은 각 그림의 (a)에 도시된 3D 분포를 통해서도 잘 확인할 수 있다.

Fig. 6 에는 앞에서 관찰한 x-y 면의 연료농도를 특정 단면에서 추출하여 다시 도시한 그림이다. $y=0.05\text{mm}$ 단면에서 중심축 근처는 연료 공급관 위치이므로 연료농도 데이터는 없다. 연료 포트의 중심축 위치인 $y=1.55\text{mm}$ 단면에서는 앞에서 설명한 바와 같이 연료가 포트에서 나와서 바깥쪽의 공기와 충분히 혼합되지 못하고 큰 농도구배를 갖는 경향을 잘 보여주고 있다. 연료농도의 구배를 볼 때 하류에서는 이미 충분히 연료-공기의 혼합이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 연료포트의 위치($y=1.55\text{mm}$)보다 상류의 영역에서는 총괄 당량비가 높은 순으로 연료농도가 높게 되는데, 이는 총괄 당량비가 과농해질수록 연료 유입량은 고정된 상태에서 공기 유입량이 줄어들었기 때문으로 당연한 결과로 판단된다.

4.2 유동특성

Fig. 7~9 에는 화염 안정성과 밀접한 축방향 속도의 3D 및 2D 분포를 도시하였다. 각 그림의 3D 분포에서의 빨간색 실선과 2D 분포에서의 점선은 축방향 유속이 0 보다 적은 음의 유속을 갖는 지점을 나타낸다. 특징적인 유속분포로는 연료포트 근처에서 음의 유속을 갖는 영역이 존재하는 것과 $\Phi=0.7$ 과 1.0 에서 하류의 중심축 근처에 재순환 영역이 생기는 점이다. 각 그림의 (b)와 (c)는 3D 유속분포를 2D 로 그린 것으로서 음의 유속을 갖는 영역이 곧 와동의 존재하는 영역을 의미하지는 않는다. 그림에 도시하지는 않았지만 유선분포를 통해 확인해 본 결과 연료포트 근처의 음의 유속을 갖는 영역은 연료류가 포트에서 분출된 후 공기류와 부딪힌 후 원주방향으로 돌면서 양과 음의 유속성분을 갖는 흐름으로 나누어지기 때문에 형성된다. $\Phi=0.7$ 과 1.0 조건에서 하류의 중심축 근처에 생기는 재순환 영역은 공기유량이 일정한 값

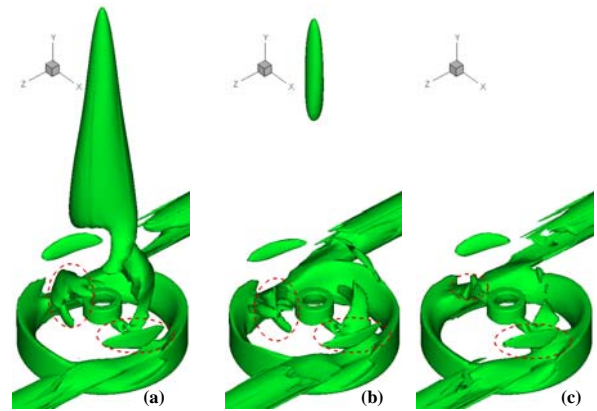


Fig. 10. Iso-surface (0m/s) of the axial velocity inside the micro cyclone combustor ($\Phi = 0.7, 1.0, 1.3$).

이상이 되어야 생기는 영역으로 본 연구에서 다루는 조건에서는 재순환 영역이 생기더라도 이 영역 내의 음의 유속성분은 매우 작은 것을 확인할 수 있었다.

만약 본 연소기를 이용하여 연소를 시킨다면 연소기 내부에서 화염 안정성과 밀접한 연관성이 있는 축방향 유속성분 분포로부터 화염이 안정화 될 가능성이 높은 영역을 알 수 있다. 우선, 연료포트 근처의 음의 유속성분을 갖는 영역과 하류의 중심축 근처의 재순환 영역을 들 수 있다. 참고로, 상류의 연소기 구석부근의 음의 유속 영역은 주로 공기만 존재하는 영역으로서 화염 선단이 위치하면서 안정화 될 수 있는 영역은 아니다. 연소가 일어날 경우 화염에 의해 고온영역에서 유동의 열팽창이 동반되기 때문에 Fig. 7, 8 에서 보이는 매우 약한 재순환 영역은 연소 시에는 사라지게 되고 화염 안정화에 별다른 영향을 미치지 않을 가능성이 높다. 따라서, 연료포트 근처의 음의 유속성분을 갖는 영역이 연료와 공기가 처음 혼합되기 시작하는 영역으로서, 화염 선단이 위치할 수 있는 곳으로 판단되며 화염 안정화에 중요한 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이러한 화염 안정화 영역과 화염 안정화 기구에 대한 구체적인 사항은 연소조건에 대한 계산연구를 통해 별도의 논문에서 다룰 예정이다.

Fig. 10 은 각 총괄 당량비 조건에 대해 축방향 유속성분이 0 인 표면(iso-surface)을 도시한 그림이다. 앞에서 설명한 바와 같이 하류 중심축 근처의 재순환 영역, 연료포트 근처와 상류 연소기 구석의 음의 유속영역을 잘 보여주고 있다. 그림에서 빨간색 점선으로 표시한 연료포트 근처의 음의 유속영역을 잘 확인할 수 있으며, 이 곳에 화염 선단이 위치하게 되며 화염은 공기 유동의 영향으로

원주방향으로 흰 형태를 가질게 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

마이크로 사이클론 연소기의 혼합 및 유동특성을 고찰할 목적으로 상용코드를 이용한 수치계산 연구를 수행하였다.

총괄 당량비에 상관없이 하류영역에서는 연료-공기의 혼합이 잘 이루어지고 있음을 알았다. 이는 제작된 사이클론 연소기 스케일에서는 확산혼합이 지배적이지 않지만 연료-공기 혼합이 충분히 가능한 유동구조를 갖기 때문이다.

$\Phi=0.7$ 과 1.0 인 조건에서는 공기유량이 크기 때문에 하류의 중심축 근처에서 약한 재순환 영역이 생긴다. 또한, 이 재순환 영역 크기는 공기유량이 커지는 희박조건으로 갈수록 더 넓어지는 것을 확인하였다.

연료포트 출구 근처에서도 연료류와 공기류의 충돌에 의해서 생성된 음의 유속영역이 존재하며, 이 영역이 연료와 공기가 처음 만나서 혼합되는 영역이므로 화염 선단이 위치하여 화염을 안정화시킬 가능성이 높을 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 2007 년도 기본연구사업지원에 의해서 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Fernandez-Pello, A. C., 2002, "Micro-power generation using combustion : Issues and approaches," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, pp. 883-899.
 (2) N. I. Kim, S. K. Kato, T. Kataoka, T. Yokomori, S. Maruyama, T. Fujimori and K. Maruta, 2005, "Flame

stabilization and emission of small swiss-roll combustors as hetero," *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 229-240.
 (3) Ahn, J., Eastwood, C., Sitzki, L. and Ronney, P. D., 2005, "Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 2463-2472.
 (4) Suzuki, Y., Hori Y. and Kasagi, N., 2003, "Micro catalytic combustor with tailored Pt/Al₂O₃ films," *PowerMEMS 2003*, pp. 23-26.
 (5) Wu, M., Wang, Y., Yang, V. and Yetter, R. A., 2007, "Combustion in meso-scale vortex combustor," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 3235-3242.
 (6) Norton, D. G. and Vlachos, D. G., 2004, "A CFD study of propane/air microflame stability," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 97-107.
 (7) Suzuki, Y., Hori Y. and Kasagi, N., 2003, "Micro catalytic combustor with tailored Pt/Al₂O₃ films," *PowerMEMS 2003*, pp. 23-26.
 (8) Wu, M., Wang, Y., Yang, V. and Yetter, R. A., 2007, "Combustion in meso-scale vortex combustor," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 3235-3242.
 (9) Norton, D. G. and Vlachos, D. G., 2004, "A CFD study of propane/air microflame stability," *Combust. Flame*, Vol. 138, pp. 97-107.
 (10) Kim, N. I., Kataoka, T., Maruyama, S and Maruta, K., 2005, "Flammable Limits of Stationary Flames in Tubes at Low Pressure," *Combust. Flame*, Vol. 141, pp. 78-88.
 (11) Cheng, T. S., Chao, Y.-C., Wu, C.-Y., Li, Y.-H., Nakamura, Y., Lee, K.-Y., Yuan, T. and Leu, T. S., 2005, "Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 30, pp. 2489-2497.
 (12) J. Posthill et al., Portable power sources using combustion of butane and thermoelectrics, *2005 Int'l. Conf. on Thermoelectrics*, 517-520 (2005).
 (13) FLUENT, FLUENT 6.0 User guide, Lebanon, N. H., (2002).
 (14) ICEM CFD Engineering, ICEM-CFD Tutorial Manual: Meshing Modules, version 10.0, (2005).
 (15) Patankar, S. V., 1980, "Numerical heat transfer and fluid flow," *McGraw-hill*.