

초소형 리포머용 2단 초소형 연소기 내 연소특성에 관한 연구

김기백[†]·권오채^{*}

Combustion Characteristics in a Two-staged Microcombustor for a Micro Reformer System

Ki Baek Kim and Oh Chae Kwon

Key Words: Microcombustor(초소형 연소기), Micro reformer(초소형 리포머), Combustion stability limits(연소안정 한계)

Abstract

A new microcombustor configuration for a micro fuel-cell reformer integrated with a micro evaporator was studied experimentally and computationally. The present microcombustor is simply cylindrical to be easily fabricated but two-staged, expending downstream, to feasibly control ignition and stable burning. Results show that the aspect ratio of the first stage and the wall thickness of the microcombustors substantially affect ignition and thermal characteristics. For the optimized design conditions, a premixed microflame was easily ignited in the expanded second stage combustor, moved into the smaller first stage combustor, and finally stabilized therein. The measured and predicted temperature distributions across the microcombustor walls indicated that heat generated in the microcombustor is well transferred. Thus, the present microcombustor configuration could be applied to the practical micro reformers integrated with a micro evaporator for use of fuel cells.

1. 서 론

기호설명

d : 내경 (mm)
l : 초소형 연소기 길이 (mm)
 \dot{q}'' : 열속 (W/m^2)
T : 온도 (K)
t : 초소형 연소기 두께 (mm)
V : 초소형 연소기 입구 유속 (m/s)
 ϕ : 당량비
 γ : 연소기의 종횡비, l/d

직접 메탄올 연료전지(DMFCs)는 연료저장의 용이성으로 인해 리튬-이온 전지를 대체할 차세대 휴대용 전원 공급 장치로 꾸준히 제시되어 왔다.⁽¹⁾ 한편 초소형 리포머 시스템이 장착된 고분자 전해질 연료전지(PEMFCs)가 에너지밀도 측면에서 직접 메탄올 연료전지보다 뛰어난 성능을 가지고 있는 것으로 알려지면서 이에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다.⁽²⁾

초소형 리포머 시스템은 제한된 공간에서 열원인 초소형 연소기로부터 리포머와 증발기로 효과적으로 열을 공급하도록 설계되어야 한다. 초소형 리포머 시스템의 성공적 설계를 위해서는 초소형 연소기 내의 안정적인 연소를 보장하는 것이 가장 중요하다. 연소기 크기가 작아질수록 외부로의 열손실이 늘어나 초소형 화염의 소멸을 일으키는 문제를 해결하기 위해서 촉매연소 방식

[†] 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과
E-mail: kika2007@hanmail.net
TEL: (031)290-7917 FAX: (031)290-5889

^{*} 회원, 성균관대학교 기계공학부

(3-7)과 열 재순환 연소방식(8,9)이 제시 되고 있다. 하지만 촉매연소 방식은 촉매 표면이 쉽게 피독 되어 지속적 사용이 어렵다는 단점이 있고 열 재순환 방식은 재순환을 구현하는 구조가 다른 구성 요소로의 효과적인 열전달을 방해할 수 있다는 단점이 있다. 본 연구는 초소형 리포머 시스템에 적용하기 위한 새로운 초소형 연소기를 설계하기 위해 다음과 같은 목적을 갖는다. 1) 수 와트 급의 초소형 연료전지를 위한 초소형 리포머의 열원으로서 연소반응에 촉매를 사용하지 않으면서 간단한 형상을 갖는 초소형 연소기의 기본 형상을 설계하고, 2) 탄화수소계 연료와 공기의 예혼합 화염의 연소안정한계 측정하며, 3) 초소형 연소기의 종횡비와 연소기 벽 두께가 연소안정한계와 연소기 벽을 통한 열전달에 미치는 영향을 평가하고, 4) 이들을 통해 최적의 초소형 연소기 형상을 제안하고자 한다.

또한 초소형 연소기 내의 화염과 연소기 벽을 통한 열전달의 특성을 이해하기 위해서 CFD 시뮬레이션을 수행하여 실험과 비교하였다.

2. 실험 및 계산 방법

Fig. 1과 같이 현재의 실험 장치는 초소형 연소기(SS-304), 연료 및 공기 공급을 위한 질량 유량계(50-100 sccm, 오차 $\pm 0.75\%$), 연소기 외부 벽면의 온도 측정을 위한 열전대(K-type) 시스템으로 구성되어 있다.

전체 2단으로 구성되어 있는 초소형 연소기는 1단과 2단의 직경($d_1 = 2.5$, $d_2 = 3.2$ mm)의 변화 없이 1단의 종횡비와 전체 벽면 두께의 효과를 평가하기 위해서 $\gamma_1 = 2.0-4.0$, $\gamma_2 = 1.6$, $t_w = 0.5-1.5$ mm로 변화를 주어 제작되었다.

분사된 상온의 혼합기가 초소형 연소기 2단 출구에서 스파크 점화를 통해서 점화되고, 이를 통해 생성된 초소형 화염은 연소기 전체의 온도를 상승시키며 1단으로 이동하여 안정화된다. 초소형 연소기에 대하여 연소안정한계와 벽면의 온도 분포를 측정하였고, 초소형 연소기내 화염은 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 사용하여 예측되었다.⁽¹⁰⁾ 지배방정식으로 축대칭 원통좌표계의 2차원 Navier-Stokes 방정식과 연속, 화학종, 에너지 방정식 등이 유한체적법으로 해석 되었고, 필요한 열화학적 물성치는 CHEMKIN 데이터베이스를

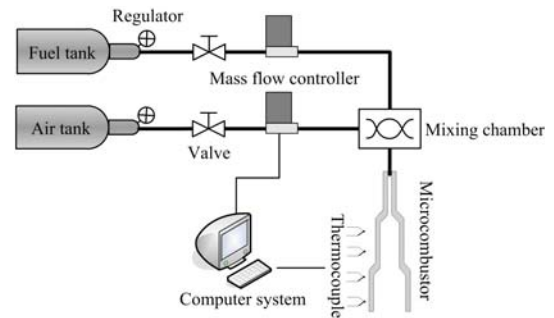


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

이용하였다.⁽¹¹⁾ 대기로 빠져나가는 열손실이 고려되었으나 복사 효과는 무시하였다. 연료로 사용된 프로판과 공기의 반응에 대해서는 7개의 화학종이 포함되어 있는 프로판-산소의 가역 4단계 반응 메커니즘이 사용되었다.⁽¹²⁾ 계산 영역은 반경방향과 축방향에 각각 10 d_1 과 12 d_1 까지 고려되었으며 20,000개의 계산격자가 사용되었고, 총 16대의 PC(CPU 3.0GHz/1대)로 구성된 병렬계산시스템을 이용하여 실험과 유사한 조건에 대해 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초소형 연소기의 기본 형상

본 연구에서 초소형 연소기는 수 와트 급의 연료 전지용 초소형 리포머의 열원으로서 설계되었다. 간단한 형상을 가지면서도 원활한 열전달을 할 수 있는 초소형 연소기의 기본형상으로 원통형 구조가 선택되었다. 초소형 연소기의 크기가 작아질수록 표면적 대 체적 비가 증가하여 더 활발한 열전달이 이루어지는 반면 점화 및 화염안정을 이루기 어렵다. 이를 보완하기 위해서 2단 초소형 연소기가 제시되었다. Fig. 2에 초소형 연소기의 기본형상과 주요 치수를 나타내었다($d_1 = 2.5$, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$, $\gamma_2 = 1.6$, $t_w = 0.5$ mm). 초소형 예혼합 화염은 상온에서 프로판-공기 혼합기의 소염거리보다 더 큰 내경을 가진 2단에서 쉽게 점화되고 2단 내의 화염에 의해서 1단의 온도가 상승한다. 결과적으로 촉매 또는 외부의 추가적 열 공급 없이 화염은 더 작은 내경을 가진 1단으로 이동한 뒤, 화염 안정을 이루게 된다.

Fig. 3은 초소형 연소기, 리포머(반응기), 증발기가 환형으로 결합되어 있는 시스템의 개념도이

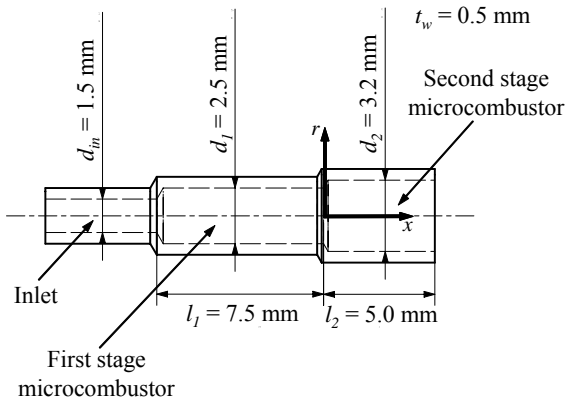


Fig. 2 Configuration of a two-staged microcombustor.

다. 초소형 연소기는 증발기와 리포머에 열을 전달하게 되고 증발기와 리포머를 거친 메탄올과 물의 혼합물이 수소로 변환하게 된다. 효과적인 개질 반응을 위해서 연소기의 2단 표면의 온도 분포는 가능한 일정해야 한다. 이후에 살펴 볼 결과는 이를 만족함을 보여준다.

3.2 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 연소기 내 안정한계

Fig. 4는 기본형 초소형 연소기(Fig. 2)에서의 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 측정 결과이다. 초소형 연소기 입구 혼합기 유속 V 와 혼합기 당량비 ϕ 에 대해 초소형 연소기 1단에서 화염이 안정화 될 때의 연소안정한계와 화염이 2단으로 밀려서 안정화 될 때의 연소안정한계가 각각 관찰되는 데 Fig. 3와같이 실제 시스템에 적용될 경우 연소기 2단에서의 연소는 의미가 없으므로 1단 내에서의 연소안정한계만 유효하다.

일반적인 매크로 이상의 연소기에서 관찰되는 경향과 유사하게 연료 과농한 영역과 연료 희박

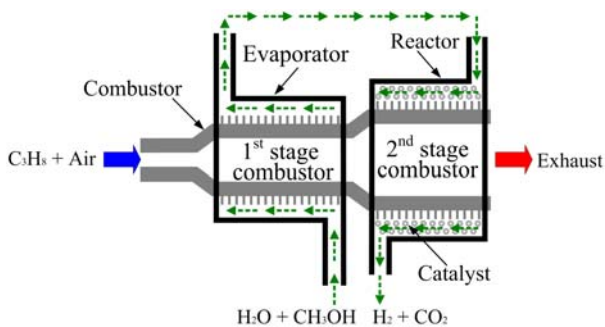


Fig. 3 A conceptual design of a microcombustor integrated with a micro reformer and a micro evaporator.

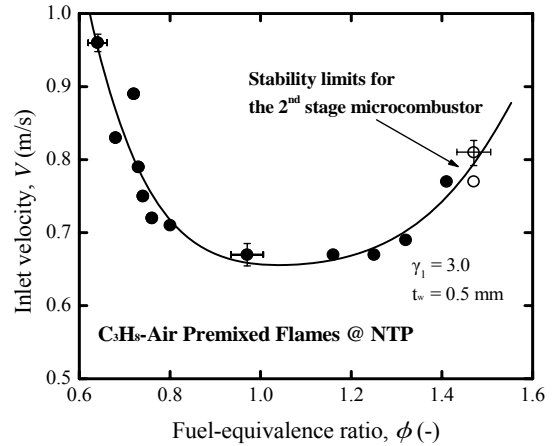


Fig. 4 Stability limits of premixed C_3H_8 -air flames in V - ϕ space for the microcombustor of $d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm.

한 영역에서 연소안정한계가 관찰되었다. 상대적으로 높은 유속에서는 당량비가 연소안정한계에 미치는 영향이 줄어들고 낮은 유속에서는 당량비가 연소안정한계에 미치는 영향이 커진다. 이는 각각 혼합기의 불충분한 체류시간 및 외부로의 열손실과 연관이 있으며⁽⁸⁾, 이러한 경향을 보이는 이유는 열 손실률은 유속 변화에 거의 무관한 반면 열 발생률은 유속에 비례하기 때문이다. 가장 낮은 한계 유속이 $\phi \approx 1$ 인 조건에서 관찰되고 연료 과농한 영역보다 연료 희박한 영역에서 연소안정한계가 더 급격히 변한다. 이는 연료 희박한 영역은 당량비가 0-1 이고 연료 과농한 영역은 1- ∞ 인 당량비의 비대칭적 정의에서 그 원인을 찾을 수 있다.

3.3 형상의 변화의 영향

초소형 연소기 1단의 중형비와 연소기 벽 두께에 따른 성능 변화를 이해하기 위하여 연소안정한계와 연소기 벽면 온도분포를 측정하였다. Fig. 5는 초소형 연소기의 중형비에 따른 연소안정한계를 측정한 것이다($\gamma_1 = 2.0, 3.0, 4.0$). 연소안정한계는 γ_1 이 증가할수록 확대되는데, 특히 연료 희박한 영역보다 연료 과농한 부분에서 명확하게 관찰된다. 이러한 경향은 혼합기의 체류시간 증가로 인해 초소형 연소기 1단 내에서 연료의 완전연소가 이루어지기 때문에 관찰된다. 연료 희박 영역에서는 연소안정한계가 γ_1 에 민감하지 않

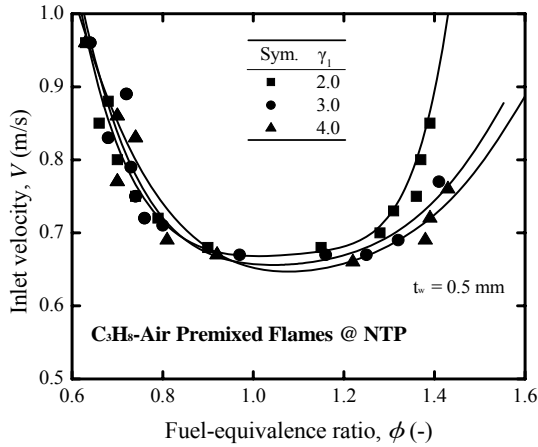


Fig. 5 Effects of γ_1 on stability limits of premixed C_3H_8 -air flames in V - ϕ space for the microcombustors of $d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm: $\gamma_1 = 2.0, 3.0$ and 4.0 .

은 이유는 혼합기 체류시간이 더 이상 연료의 완전연소에 영향을 미치지 않기 때문이다. 이상의 관찰은 시스템을 구성하는데 있어서 가능한 큰 값의 종횡비를 갖는 초소형 연소기를 설계하는 것이 연소안정한계 측면에서 바람직하다는 것을 보여준다.

초소형 연소기 1단의 종횡비에 따른 초소형 연소기 벽면의 온도분포를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다($\gamma_1 = 2.0, 3.0, 4.0$). 실험조건은 $\phi = 0.9, V = 0.79$ m/s이다. γ_1 이 증가함에 따라 2단 연소기의 온도는 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 1단 연소기 벽을 통한 외부로의 열 전달량이 늘어났기 때문에 관찰된다. 연소기 2단 외부 벽면에서의 온도분포의 균일성은 거의 동일하다. γ_1 의 증가로 혼합기의 체류시간이 길어지기 때문에 최고온도는 총 열전달량의 증가와 함께 감소한다. 또한 최고온도지점의 위치도 상대적으로 상류쪽으로 이동한다. 초소형 화염의 수치해석 결과는 전반적으로 온도가 다소 높게 예측되었지만, 실험 결과 나타난 경향과 정성적으로 매우 유사하다. 각각의 종횡비에 따른 열속을 수치적으로 예측한 결과를 보여주는 Fig. 7은 γ_1 을 변화시켜 초소형 연소기 표면의 열속을 조절할 수 있음을 보여준다.

Fig. 8은 초소형 연소기의 두께에 따른 연소안정한계를 측정된 것이다($t_w = 0.5, 1.5$ mm). 연소

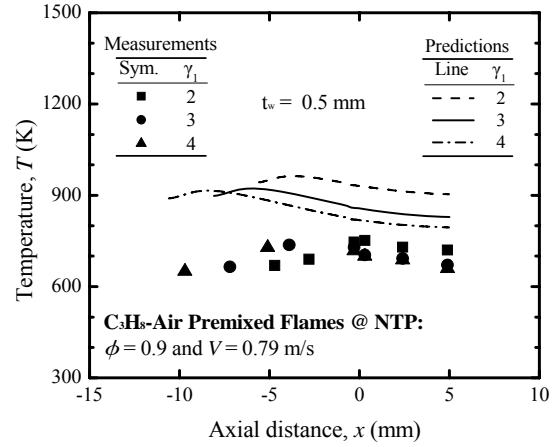


Fig. 6 Effects of γ_1 on temperature distribution along the outer wall surface of microcombustors ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP: $\gamma_1 = 2.0, 3.0$ and 4.0 . Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁽¹²⁾

안정한계는 t_w 가 감소할수록 확대되는데 그 효과는 종횡비 변화에 의한 영향보다는 낮게 나타난다. t_w 가 증가함에 따라 연소안정한계가 축소되는 현상은 초소형 연소기의 축방향으로 빠져나가는 열 손실이 증가하기 때문에 관찰된다. 이러한 관찰은 가능한 얇은 두께의 초소형 연소기를 설계

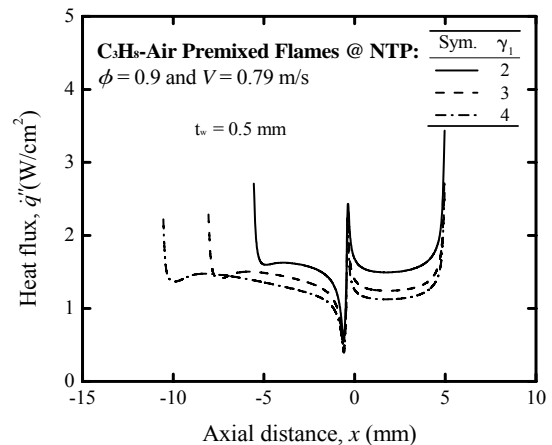


Fig. 7 Effects of γ_1 on radial heat fluxes through the wall of microcombustors ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP: $\gamma_1 = 2.0, 3.0$ and 4.0 . Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁽¹²⁾

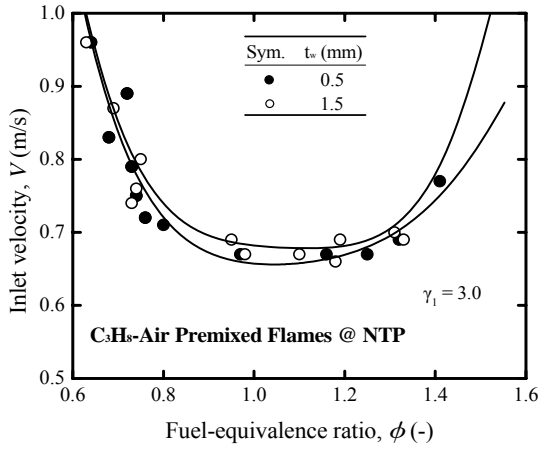


Fig. 8 Effects of t_w on stability limits of premixed C_3H_8 -air flames in V - ϕ space for the microcombustors of $d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$ and $\gamma_2 = 1.6$: $t_w = 0.5$ and 1.5 mm.

하는 것이 연소안정한계 측면에서 장점을 가진다는 것을 보여준다.

초소형 연소기의 두께에 따른 연소기 벽면의 온도분포를 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다($t_w = 0.5, 1.5$ mm). 실험조건은 $\phi = 0.9$, $V = 0.79$ m/s로 t_w 가 증가함에 따라 축방향으로 빠져 나가는 열손실이 늘어나기 때문에 초소형 연소기의 전체 온도는 감소하고 반면 온도분포는 더 균일해 짐을 알 수 있다. 초소형 화염의 수치해석 결

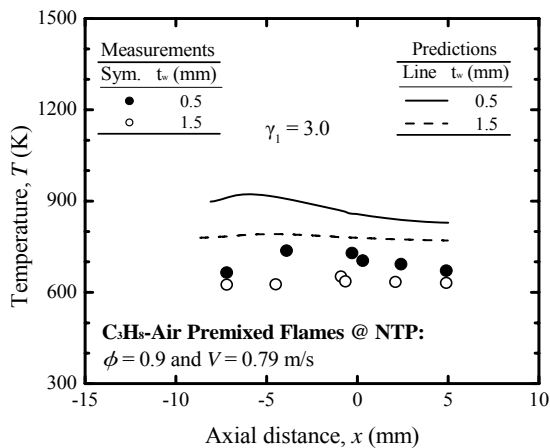


Fig. 9 Effects of t_w on temperature distribution along the outer wall surface of microcombustors ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$ and $\gamma_2 = 1.6$) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP: $t_w = 0.5$ and 1.5 mm. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁽¹²⁾

과는 전반적으로 온도가 다소 높게 예측되는 것을 보여주지만, 실험결과 나타난 경향과 매우 유사한 정성적 결과를 보여주고 있다. 마지막으로 Fig. 10은 연소기 벽 두께의 증가에 따라 축방향으로 빠져나가는 열손실과 표면적의 증가로 열속이 줄어드는 것을 보여준다. 수치해석 결과를 현재의 실험 조건에서 초소형 연소기 두께가 0.5 mm에서 1.5 mm로 늘어났을 때 반경방향 대비 축방향으로 빠져나가는 열손실의 비율이 2.7%에서 6.4%로 늘어남을 보여준다. 이러한 경향은 에너지 방정식으로부터 열 손실이 $(t_w/d)^2$ 에 비례한다는 단순한 해석을 통해서도 예측 가능하다.

3.4 최적 설계 조건

2단 초소형 연소기의 형상의 변화에 따른 성능 변화에 대해서 살펴본 결과, 안정적인 연소를 위해서는 시스템을 구성하는데 있어서 가능한 큰 값의 종횡비와 얇은 벽 두께를 갖는 초소형 연소기를 설계하는 것이 바람직한 반면 열속의 균일성은 연소기 벽을 두껍게 함으로써 달성할 수 있다. 따라서 초소형 연소기에 요구되는 성능의 우선순위에 따라 연소기의 적절한 두께를 선택해야 한다.

4. 결론

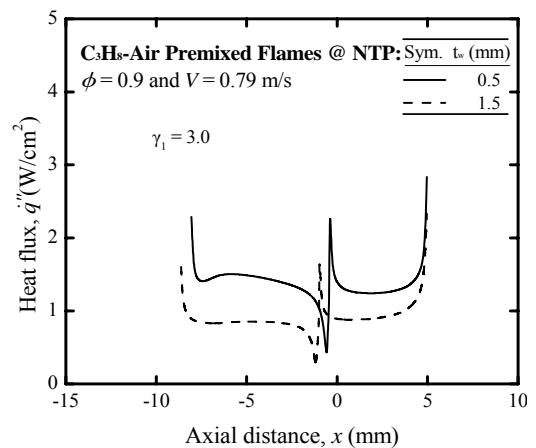


Fig. 10 Effects of t_w on radial heat fluxes through the wall of microcombustors ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$ and $\gamma_2 = 1.6$) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP: $t_w = 0.5$ and 1.5 mm. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁽¹²⁾

초소형 리포머 시스템의 핵심 요소인 초소형 연소기를 실험 및 수치해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

본 연구에서는 수 와트 급의 연료전지를 위한 초소형 리포머 시스템용 초소형 연소기의 설계요구조건인 제한된 공간에서의 안정적인 연소, 연소기 벽을 통한 최대한 많은 열전달량, 연소기 외벽의 균일한 온도분포를 만족시키기 위하여 2단 원통형 연소기를 제시하였고 이에 대한 실험 및 수치해석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 최적화된 실험 조건에서 초소형 예혼합 화염은 확장된 내경을 가진 초소형 연소기의 2단 내에서 쉽게 점화되고, 더 작은 내경의 1단으로 이동한 후 안정화 된다.

2) 실험을 통해 측정되고 수치해석을 통해 예측된 초소형 연소기의 온도분포는 연소기 내에서 발생된 열이 가상의 구성 요소인 리포머와 증발기로 원활하게 전달됨을 보여준다.

3) 초소형 연소기의 연소안정한계는 연소기 1단의 종횡비가 증가할수록 확대된다.

4) 초소형 연소기의 벽이 얇아질수록 연소안정한계는 확대되지만 온도분포의 균일성은 줄어드는 결과를 보여준다. 따라서 초소형 연소기 형상의 최적화를 위해서는 초소형 리포머 시스템에서 요구되는 성능들의 우선순위에 따라 적절한 두께가 선택되어야 한다.

후 기

본 논문은 에너지관리공단의 2004년도 에너지 기술학술진흥사업 지원을 받아 연구되었음(과제 번호: 2004-03-0012-0-000).

참고 문헌

(1) Lu, G. Q. and Wang, C. Y., 2005, "Development of micro direct methanol fuel cells for high power applications," *J. Power Sources*, Vol. 144, pp. 141~145.
 (2) Shioya, M., 2006, "Expectation of micro fuel cell technology," 2nd Int. Hydrogen & Fuel Cell

Expo, pp. 69~85.

(3) Holladay, J. D., Jones, E. O., Dagle, R. A., Xia, G. G., Cao, C. and Wang, Y., 2004, "High efficiency and low carbon monoxide micro-scale methanol processors," *J. Power Sources*, Vol. 131, pp. 69~72.
 (4) Ryi, S-K., Park, J-S., Choi, S-H., Cho, S-H. and Kim, S-H., 2005, "Novel micro fuel processor for PEMFCs with heat generation by catalytic combustion," *Chem. Eng. J.*, Vol. 113, pp. 47~53.
 (5) Okamasa, T., Lee, G-G., Suzuki, Y., Kasagi, N. and Matsuda, S., 2006, "Development of a micro catalytic combustor using high-precision ceramic tape casting," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 198~205.
 (6) Yoshida, K., Tanaka, S., Hiraki, H. and Esashi M., 2006, "A micro fuel reformer integrated with a combustor and a microchannel evaporator," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 191~197.
 (7) Park, D-E., Kim, T., Kwon, S., Kim, C-K. and Yoon, E., 2007, "Micromachined methanol steam reforming system as a hydrogen supplier for portable proton exchange membrane fuel cells," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 135, pp. 58~66.
 (8) 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.
 (9) Kim, N. I., Aizumi, S., Yokomori, T., Kato, S., Fujimori, T. and Maruta, K., 2007, "Development and scale effects of small Swiss-roll combustors," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, pp. 3243~3250.
 (10) Fluent Inc., 2005, "Fluent 6.2 User's Guide," Fluent Inc., Lebanon, NH, USA.
 (11) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1992, "The CHEMKIN Thermodynamic Data Base," *Report No. SAND87-8215B*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA.
 (12) Hautman, D. J., Dryer, F. L., Schug, K. P. and Glassman, I., 1981, "A multiple-step overall kinetic mechanism for the oxidation of hydrocarbons," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 25, pp. 219~235.