

초소형 2단 연소기를 이용한 리포머 시스템에 관한 연구

김기백*, 이정학*, 권오채**†

*성균관대학교 대학원, **성균관대학교 기계공학부

Studies on a Micro Reformer System with a Two-staged Microcombustor

Ki Baek Kim*, Jung Hak Lee*, Oh Chae Kwon**†

*Grad. School of Sungkyunkwan Univ.

**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

300 Chunchun-dong Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

ABSTRACT

A new micro reformer system consisted of a micro reformer, a microcombustor and a micro evaporator was studied experimentally and computationally. In order to satisfy the primary requirements for designing the microcombustor integrated with a micro evaporator, i.e. stable burning in a small confinement and maximum heat transfer through a wall, the present microcombustor is simply cylindrical to be easily fabricated but two-staged (expanding downstream) to feasibly control ignition and stable burning. Results show that the aspect ratio and wall thickness of the microcombustor 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. A micro reformer system integrated with a modified microcombustor based on the optimized design condition was fabricated. For a typical operating condition, the designed micro reformer system produced 22.3 sccm hydrogen (3.61 W in LHV) in an overall efficiency of 12%.

Key Word : microcombustor(초소형 연소기), micro reformer(초소형 리포머), methanol steam reforming(메탄올 수증기 개질), hydrogen(수소)

Nomenclature

d : Inner diameter, mm

l : Microcombustor length, mm

\dot{m} : Flow rate, sccm

† Corresponding author : okwon@skku.edu

- \dot{q}'' : Heat flux, W/m²
- r : Radius coordinate
- T : Temperature, K
- t : Wall thickness, mm
- V : Microcombustor inlet velocity, m/s
- X_f : Mole fraction of fuel
- x : Axial coordinate
- φ : Fuel-equivalence ratio
- γ : Aspect ratio of each stage of combustor

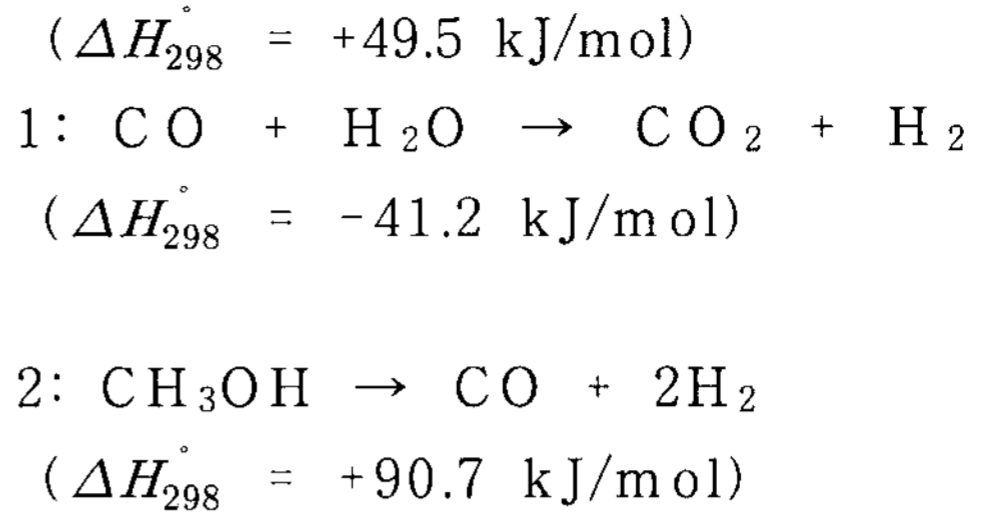
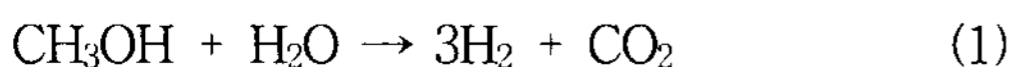
Subscripts

- in : Microcombustor inlet
- w : Wall of microcombustor
- 1 : The first-staged microcombustor
- 2 : The second-staged microcombustor

1. 서 론

최근 휴대용 전자기기의 발달로 이동전원의 필요 전력이 커지면서 직접 메탄올 연료전지(DMFC)가 연료저장의 용이성으로 인해 리튬-이온 전지를 대체할 차세대 휴대용 전원 공급 장치로 꾸준히 제시되어 왔다.¹⁾ 한편 초소형 리포머 시스템이 장착된 고분자전해질 연료전지(PEMFC)가 에너지밀도와 스택의 수명 측면에서 직접 메탄올 연료전지보다 뛰어난 성능을 가지고 있는 것으로 알려지면서 이에 대한 연구도 최근 활발히 진행되고 있다.²⁾

증발기, 리포머(반응기) 그리고 연소기로 구성되어 있는 초소형 리포머 시스템은 메탄올-물 혼합물로부터 고분자 전해질 연료전지로 수소를 공급하는 역할을 한다. 전체 시스템의 열원인 초소형 연소기는 메탄올-물 혼합물을 증발시키는 증발기와 증발된 혼합물을 촉매(CuO/ZnO/Al₂O₃)를 통한 흡열반응으로 수소로 변환시키는 역할을 하는 리포머에 열을 공급한다. 메탄올-물 혼합물의 리포밍 반응식은 다음과 같다.³⁾



초소형 리포머 시스템의 성공적 설계를 위해서는 초소형 연소기 내의 안정적인 연소를 보장하는 것이 가장 중요하다. 전체 시스템의 소형화에 따라 연소기의 크기도 작아지는데, 이로 인한 표면적 대 체적 비 증가가 외부로의 열손실을 증가시켜 초소형 화염의 소멸을 일으키는 문제가 발생한다. 또한 연료전지의 수명에 치명적인 영향을 주는 일산화탄소의 양을 줄이기 위해서 리포머 내부의 온도분포를 일정하게 유지하는 것이 필요하고 적정 온도와 체류시간의 확보를 통해서 리포밍가스의 변환율을 높이기 위한 노력이 필요하다.

본 연구에서는 안정적인 연소가 가능한 초소형 연소기의 기본형상을 설계하고 이를 이용하여 리포머 시스템의 기본형상을 설계·제작하며 측정된 리포머 외부 표면온도를 기준으로 CFD 시뮬레이션을 통해서 메탄올-물 혼합물의 유량에 따른 리포머 내부 유체 온도를 예측하여 촉매반응에 적절한 유량범위를 평가한다. 적절한 유량 조건에서 리포밍된 생성가스의 생산율, 변환율, 수소 및 일산화탄소의 비율을 측정한다. 이들을 통해 설계된 초소형 리포머 시스템에 최적화된 작동조건을 제안하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1과 같이 실험 장치는 스테인리스 스틸(SS-304)로 가공된 초소형 리포머 시스템, 연료 및 공기의 공급을 위한 질량 유량계(Teledyne Hasting Instrument: 50-500 sccm, 오차 ±0.75%), 연소기 외부 벽면의 온도 측정을 위한 열전대

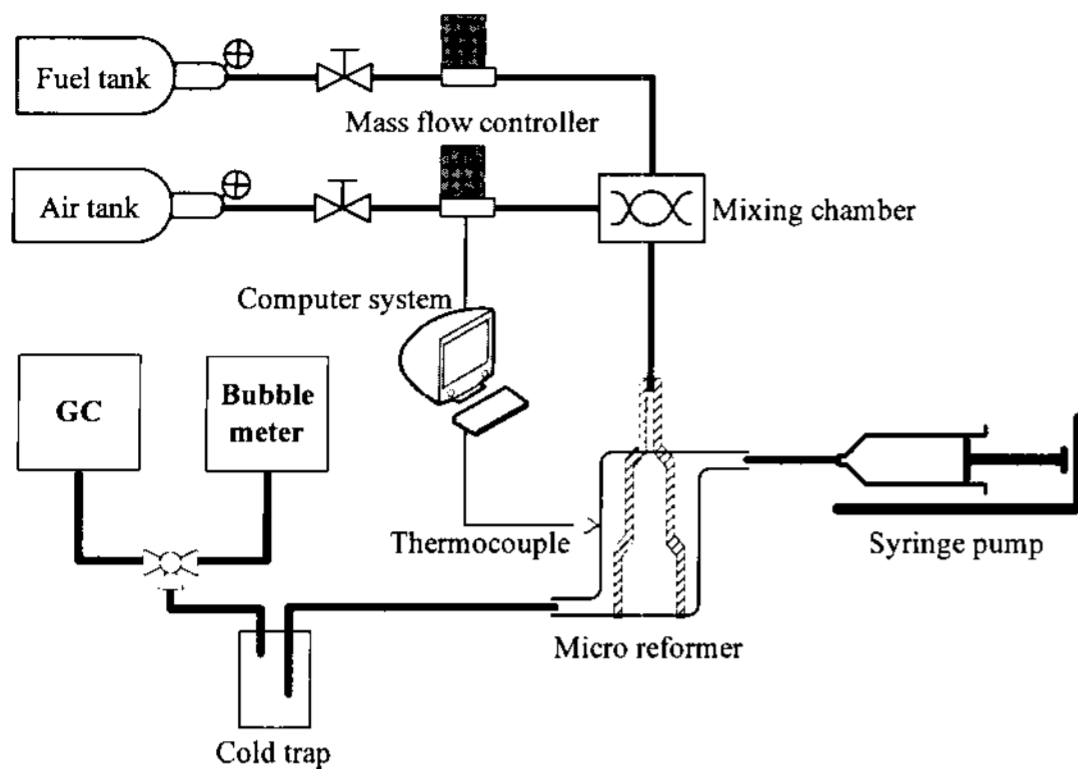


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

(K-type) 시스템, 메탄올 - 물 혼합물 공급을 위한 주사기 펌프(KDS200: 0.001ml/h-147 ml/min, 오차 $\pm 1\%$), gas chromatograph(GC, agilent 6890), bubble meter로 구성되어있다.

분사된 상온의 프로판 - 공기 혼합기는 초소형 연소기 2단 출구에서 스파크 점화를 통해서 점화 되고, 이를 통해 생성된 초소형 화염은 연소기 2단 내에서 안정화되어 연소기 전체의 온도를 상승시키며, 다시 1단으로 이동하여 안정화된다. 초소형 연소기를 통하여 분사되는 프로판 - 공기 혼합기 (당량비 $\phi = 0.9$, 분사속도 $V = 0.79$ m/s)의 초소형 화염과 주사기 펌프를 통하여 공급되는 S/C ratio(molar ratio of water and methanol) = $1.38^{(4)}$ 의 메탄올 - 물 혼합물을 기본 실험 조건으로 외부 를 단열시켜 각각의 실험 조건에서 리포머 벽면 중심부의 온도를 측정하였고, 체류시간의 부족 등으로 완전히 반응이 일어나지 않고 남은 액체들을 cold trap 을 통해서 걸러지고 남은 리포밍된 생성 가스의 변환율과 생성가스 내에서 수소 및 일산화 탄소의 비율을 알아보기 위하여 각각 bubble meter 와 GC를 통하여 측정하였다.

2.2 계산방법

초소형 연소기내 화염과 리포머 내부 유동은 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 사용하여 예측되었다.⁵⁾ 지배 방정식으로 축대칭 원통좌표계의 2차원

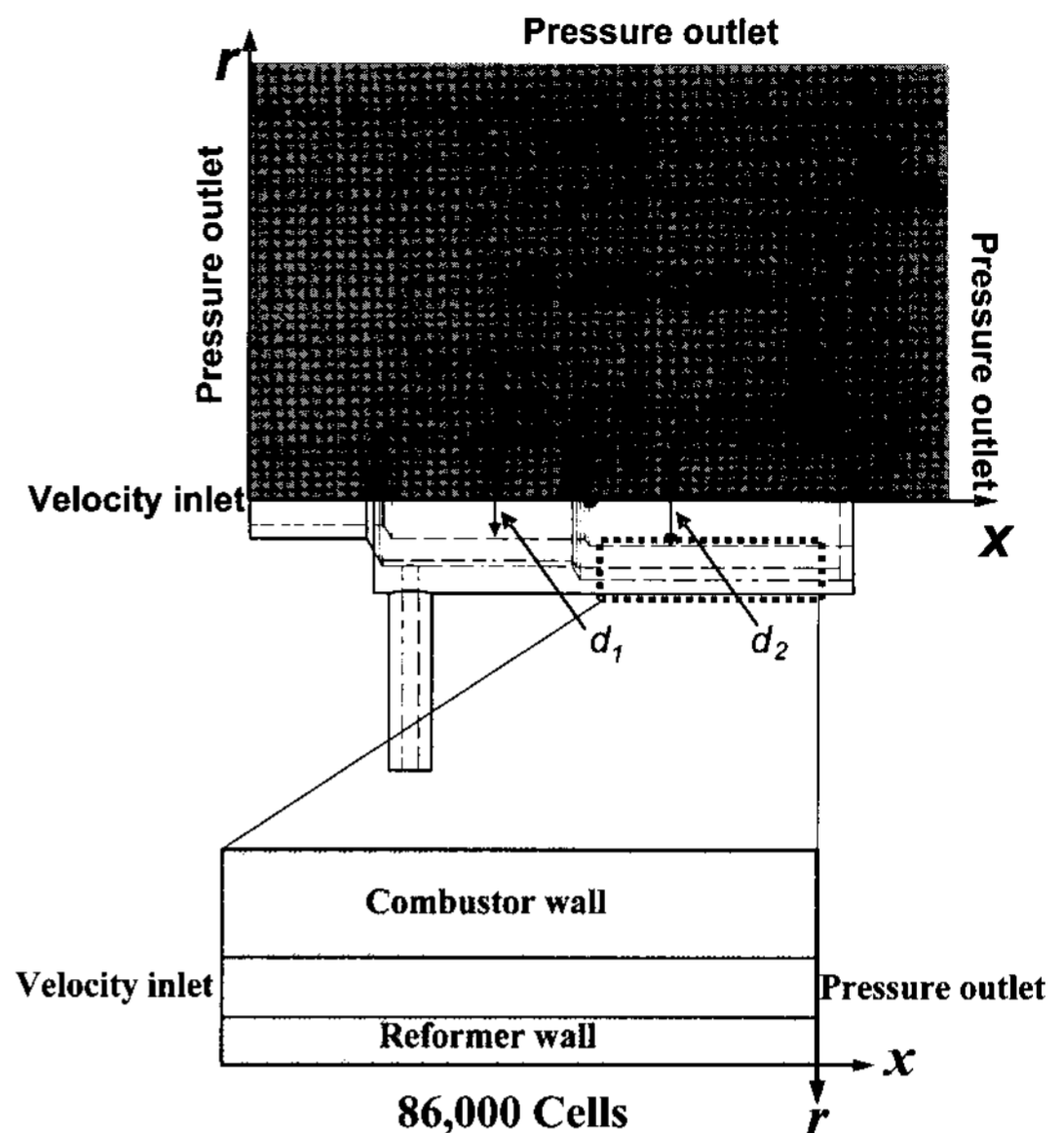


Fig. 2 Computational domain.

Navier - Stokes 방정식과 연속, 화학종, 에너지 방정식 등이 유한체적법으로 해석 되었고, 필요한 열 화학적 물성치는 CHEMKIN 데이터베이스를 이용 하였다.⁶⁾ 초소형 연소기의 외부는 상온의 대기로 가정하고 빠져나가는 열손실이 고려되었으나 복사 효과는 무시하였다. 연료로 사용된 프로판과 공기의 반응에 대해서는 7개의 화학종(C_3H_8 , O_2 , C_2H_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2O)이 포함되어 있는 프로판 - 산소의 가역 4단계 반응 메커니즘이 사용되었으며⁷⁾, multicomponent diffusion, 열확산을 고려하여 계산하였다. Fig. 2와 같이 연소기의 계산 영역은 반경방향과 축 방향으로 각각 $10d_1$ 과 $12d_1$ 까지 고려 되었으며 20,000개의 계산격자가 사용되었고, 리포머의 계산 영역은 전체 리포머 시스템 중에서 연소기 벽면에서 리포머 벽면까지 86,000개의 계산 격자가 사용되어 모델링되었다. 리포머 내부는 공극률 0.194의 porous media로 가정하고 입구로 들어오는 작동유체는 373 K의 기화된 메탄올 - 수증기의 혼합물(S/C ratio = 1.38)이라고 가정하였다. 리포머와 연소기 벽면의 물성치에는 온도에 따른 스테인리스 스틸의 열전달 계수와 비열 값을 적용 하였고⁸⁾, UDF 코드를 이용하여 측정된 벽면 온도를

기준으로 내부 연소기 벽면의 평균 온도를 시행착오 (trial and error) 방식으로 구하여 리포머 내부 유동을 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초소형 연소기의 기본 형상

본 연구에서 초소형 연소기는 수 와트 급의 연료 전지용 초소형 리포머 시스템의 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 초소형 2단 연소기가 제시되었다. Fig. 3에 초소형 연소기의 기본형상과 주요 치수를 나타내었다($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ 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, 화염안정을 이루게 된다.

Fig. 4는 $\phi = 0.9$, $V = 0.79$ m/s 의 조건에서

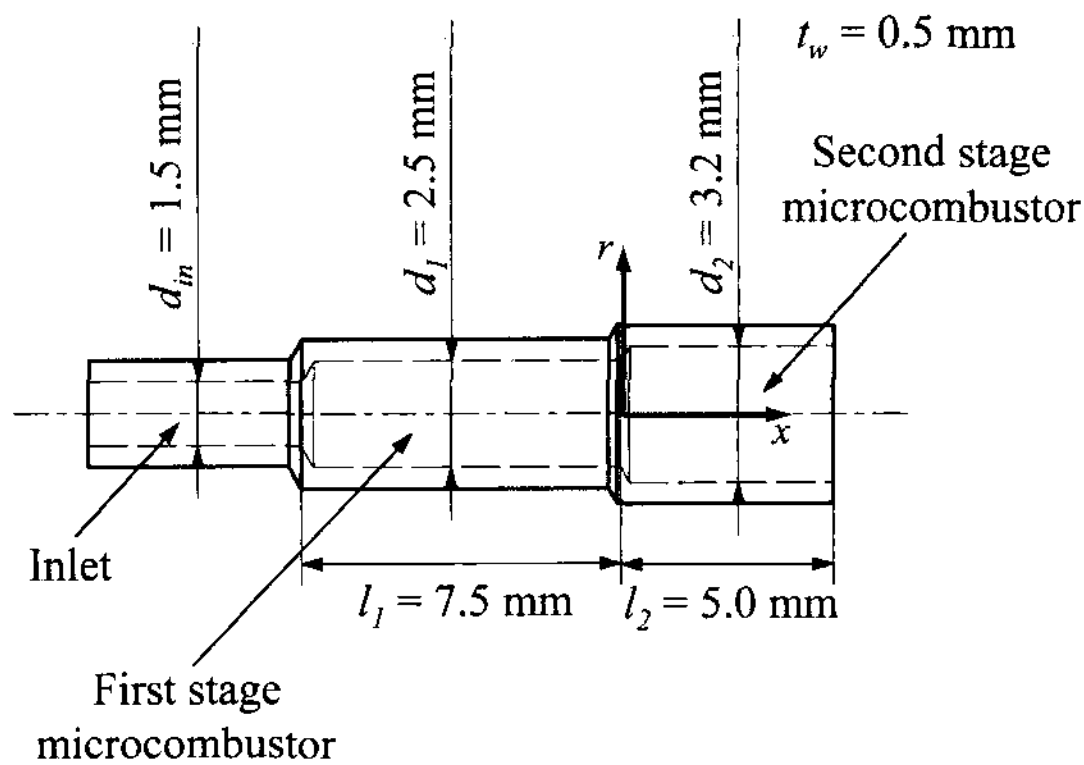


Fig. 3 Configuration of a two-staged microcombustor. Adopted from Kim and Kwon.⁹⁾

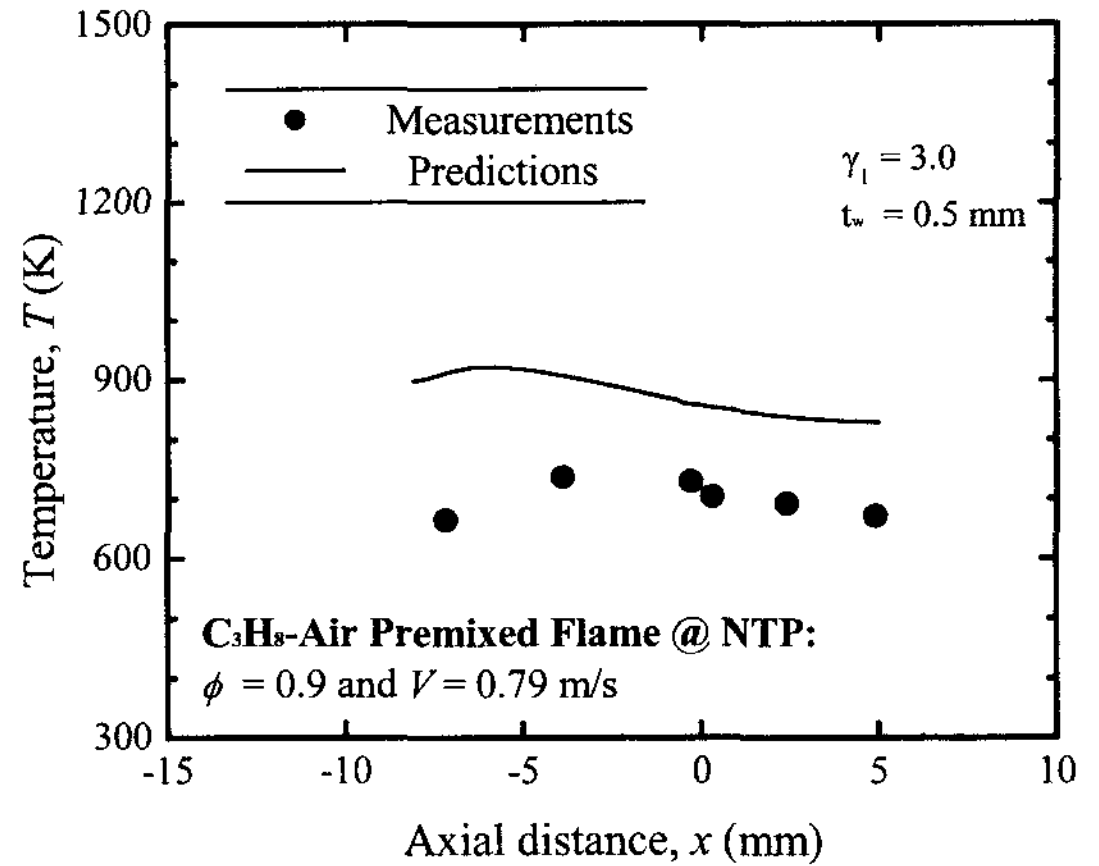


Fig. 4 Measured and predicted temperature distribution along the outer wall surface of the microcombustor ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁷⁾ Adopted from Kim and Kwon.⁹⁾

Fig. 3의 초소형 2단 연소기 벽면의 온도분포를 나타낸 것이다. 나타낸 당량비와 속도는 연소안정영역 내에서의 조건이다. 수치해석으로 예측된 온도와 연료의 몰분율의 분포를 Fig. 5에 나타내었다.

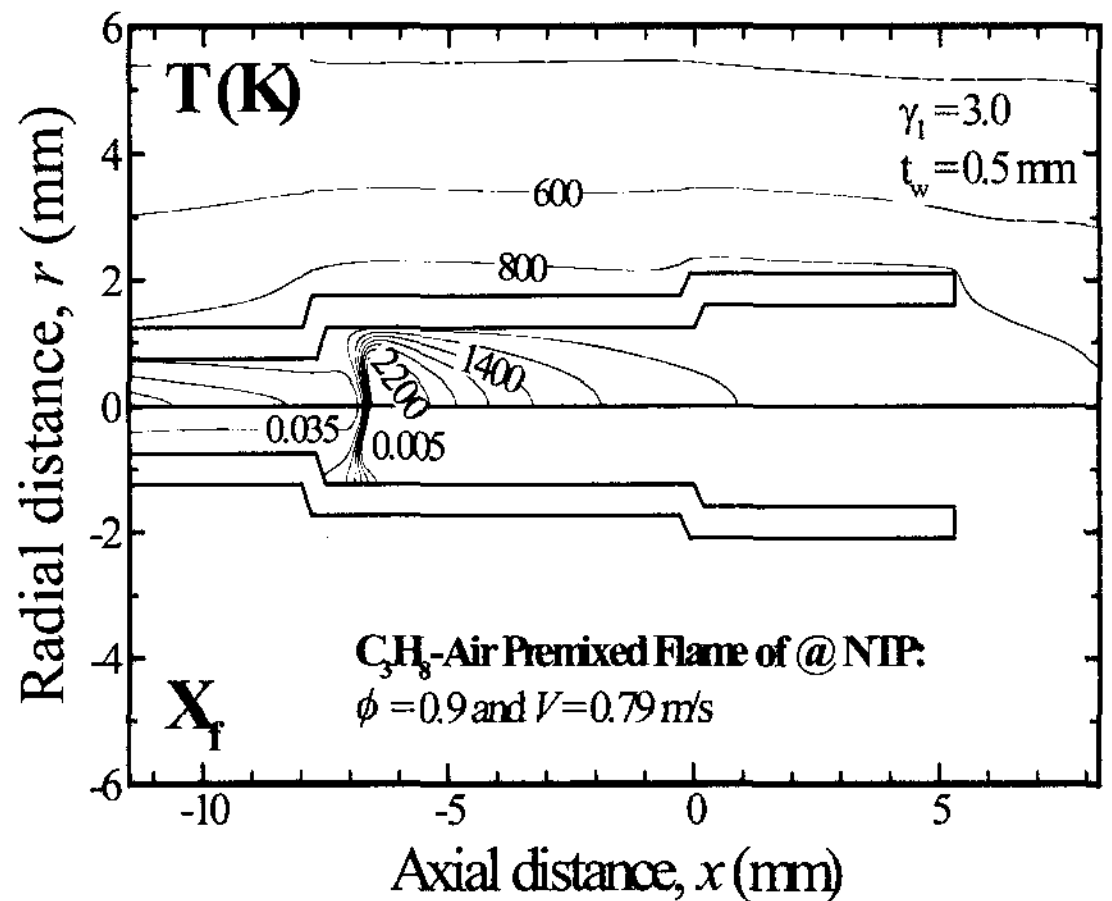


Fig. 5 Predicted distributions of temperature and mole fraction of fuel in the microcombustor ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁷⁾ Adopted from Kim and Kwon.⁹⁾

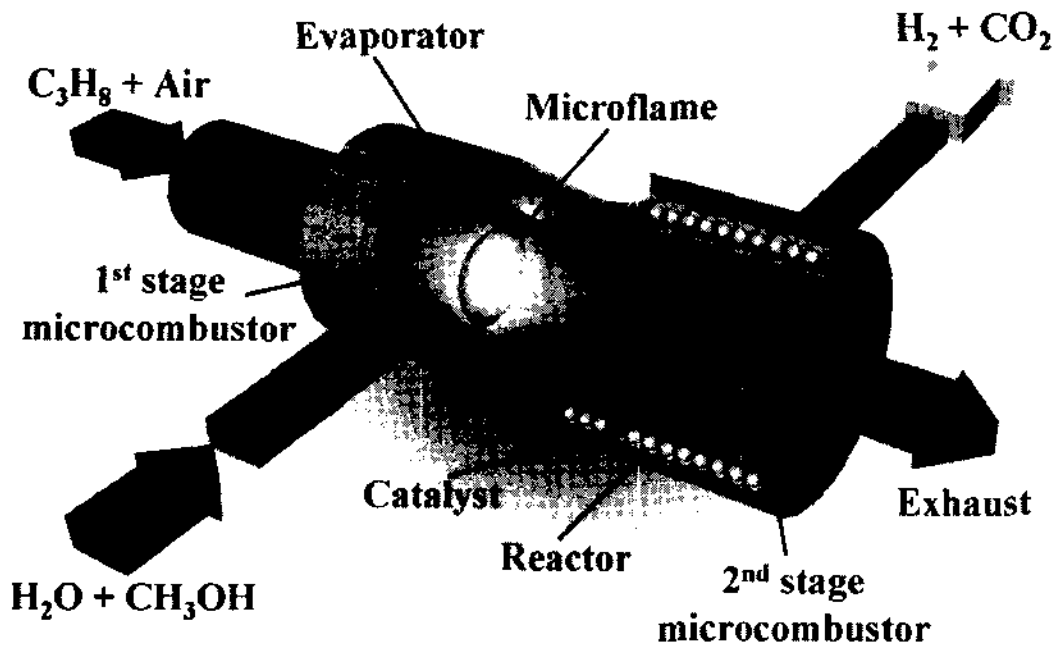


Fig. 6 A conceptual design of the microcombustor integrated with a micro reformer and a micro evaporator.

최고 온도의 위치가 정확히 예측되지 않았고 온도 분포 또한 다소 높게 예측되었지만 관찰된 경향과 정성적으로 잘 일치한다. 예측된 연료의 몰분율은 연료가 초소형 연소기 1단에서 완전히 소모되었고, 이는 실험조건에 해당하는 혼합기의 체류시간이 초소형 연소기 1단내에서 완전 연소가 일어나기 충분함을 보여준다. Fig. 6은 초소형 연소기와 초소형 증발기가 통합되어 있는 초소형 리포머 시스템의 개념도를 보여준다. 이 시스템은 열을 공급

하는 초소형 연소기를 중심으로 각각의 구성요소가 환형으로 결합되어 있다. 초소형 연소기는 증발기와 리포머(반응기)에 열을 전달하게 되고 증발기와 리포머를 거친 메탄올-물 혼합물이 수소로 변환하게 된다. 변환된 생성물 내의 일산화탄소 비율을 줄이기 위해서는 리포밍반응이 일어나는 리포머 내의 온도구배가 적어야 하기 때문에 리포머가 감싸고 있는 초소형 연소기 2단의 벽면온도 분포가 가능한 일정해야 한다. Fig. 7에는 Fig. 4와 Fig. 5의 조건에서 연소기 벽면을 따라 예측된 반경 방향의 열속을 보여주고 있는데 이는 증발기 내에서 메탄올-물 증발과 리포머 내에서 혼합물의 개질반응에 적합한 양이다.^{10,11)}

초소형 2단 연소기에 대한 선행연구는 초소형 연소기 1단의 종횡비가 증가할수록 연소안정한계가 확대되고, 연소기의 벽이 얇아질수록 연소안정한계는 확대되지만 온도분포의 균일성은 줄어드는 결과를 보여준다.⁹⁾ 따라서 초소형 연소기 형상의 최적화를 위해서는 초소형 리포머 시스템에서 요구되는 성능들의 우선순위에 따라 적절한 두께가 선택되어야 한다.

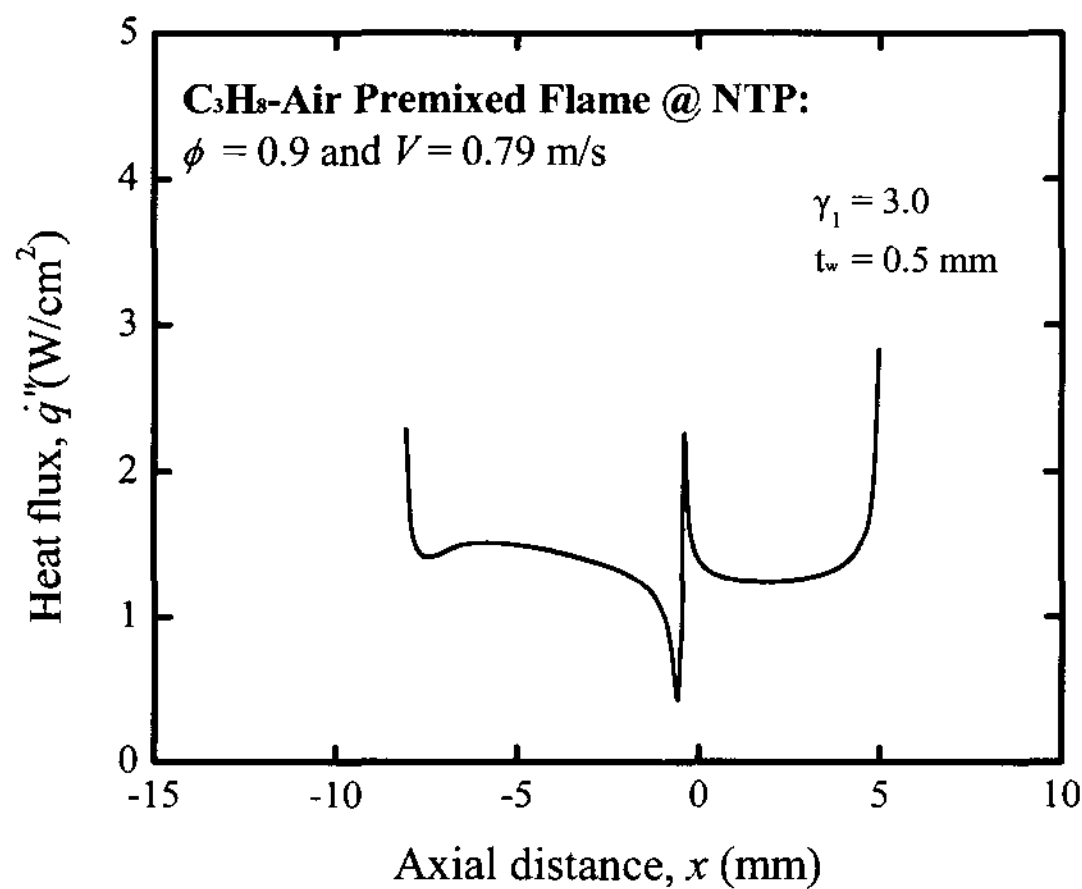


Fig. 7 Predicted radial heat fluxes through the wall of microcombustor ($d_1 = 2.5$ mm, $d_2 = 3.2$ mm, $\gamma_1 = 3.0$, $\gamma_2 = 1.6$ and $t_w = 0.5$ mm) for a C_3H_8 -air mixture of $\phi = 0.9$ and $V = 0.79$ m/s at NTP. Predictions based on the reaction mechanism due to Hautman et al.⁷⁾ Adopted from Kim and Kwon.⁹⁾

3.2 리포머 시스템의 기본 형상

본 연구에서 초소형 리포머 시스템은 수 와트 급의 연료 전지에 순수한 수소를 공급하기 위해서 설계되었다. 전술한 초소형 연소기를 중심으로 환형으로 증발기와 리포머를 결합시켜 전체 리포머 시스템이 제작되었다.

Fig. 8에 초소형 리포머 시스템의 기본 형상과 주요 치수를 나타내었다. 초소형 리포머 시스템의 열원인 초소형 2단 연소기는 1단과 2단의 직경이 각각 3, 3.5 mm, 각 단의 길이는 7.5, 10 mm, 벽 두께 0.8 mm로 제작되었다. 리포머 내에서의 체류시간의 확보, 열전달 면적의 증가를 위해서 앞에서 제시한 초소형 연소기 보다 각 단의 직경을 각각 0.5 mm, 0.3 mm 씩 증가시켰으며 메탄올-물 혼합물의 기화를 위한 증발기와 촉매반응을 위한 리포머에서 필요열량의 차이(76.1 kJ/mol: 49.5

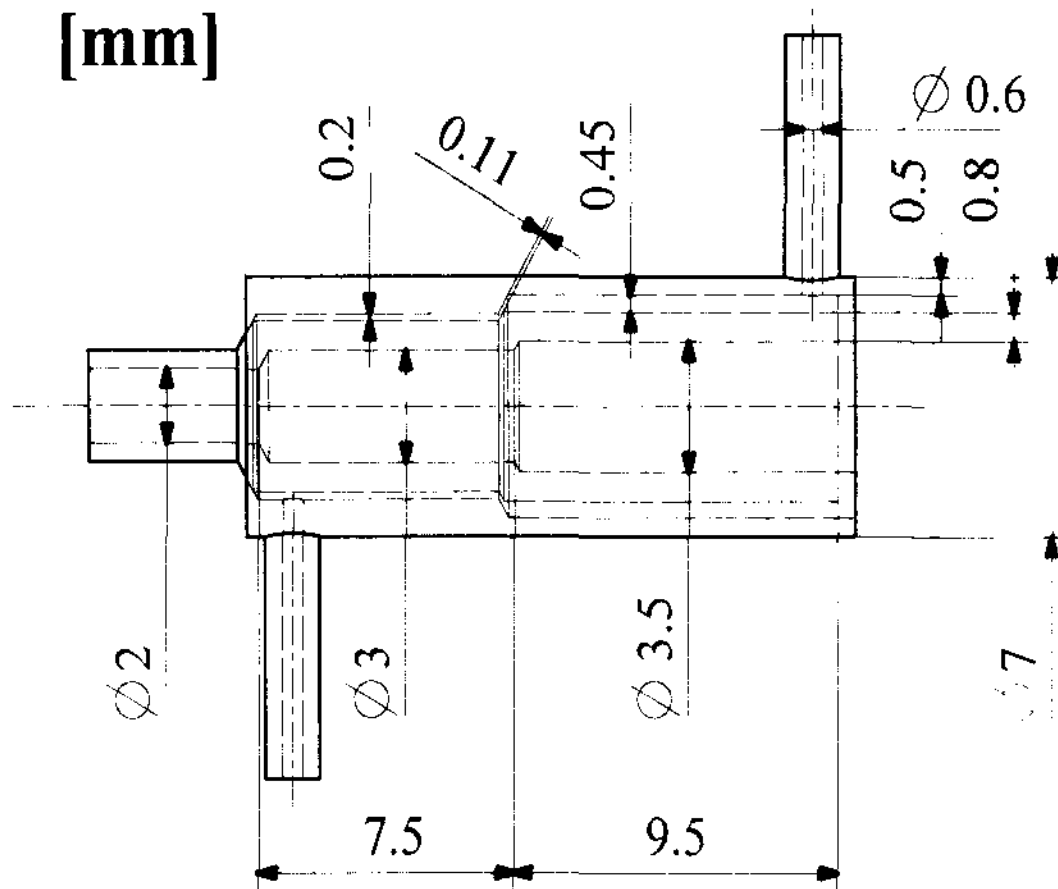


Fig. 8 Configuration of a micro reformer system.

kJ/mol), 수치해석을 통해 평가된 각 단으로부터 빠져나가는 열량의 차이와 상변화로 인한 체류시간을 고려하여 연소기 2단의 길이를 4.5 mm 증가시켰다. 또한 리포머 내에서 일정한 온도분포를 위해 벽 두께도 0.3 mm 증가시켰다.

초소형 연소기를 환형으로 감싸고 있는 증발기와 리포머는 각각 0.2 mm, 0.45 mm의 내부 통로를 확보하여 제작되었고, 리포머 내부에는 상용 CuO/ZnO/Al₂O₃ 촉매(JOHNSON MATTHEY: Katalco 83-3M)를 평균 직경 0.21 mm의 크기로 분쇄하여 투입하였다. CuO/ZnO/Al₂O₃ 촉매가 리포머 내부에서 증발기로 이동하는 것을 방지하기 위해서 증발기와 리포머 사이의 통로는 촉매의 직경보다 작은 0.11 mm로 유지하여 제작되었고 증발기와 리포머 양 끝단에 직경 0.6 mm의 입구와 출구를 확보하였다.

중심부의 초소형 연소기부분과 외부의 리포머 부분으로 나누어 마이크로 머시닝 기법으로 제작한 뒤 촉매를 투입한 후 high temperature epoxy로 밀봉하였다.

3.3 리포머 내 유체 온도 예측

초소형 연소기를 통하여 분사되는 프로판-공기 혼합기의 초소형 화염의 조건은 실험을 통하여 초소형 연소기 1단 내에서 화염안정이 가능한 최대

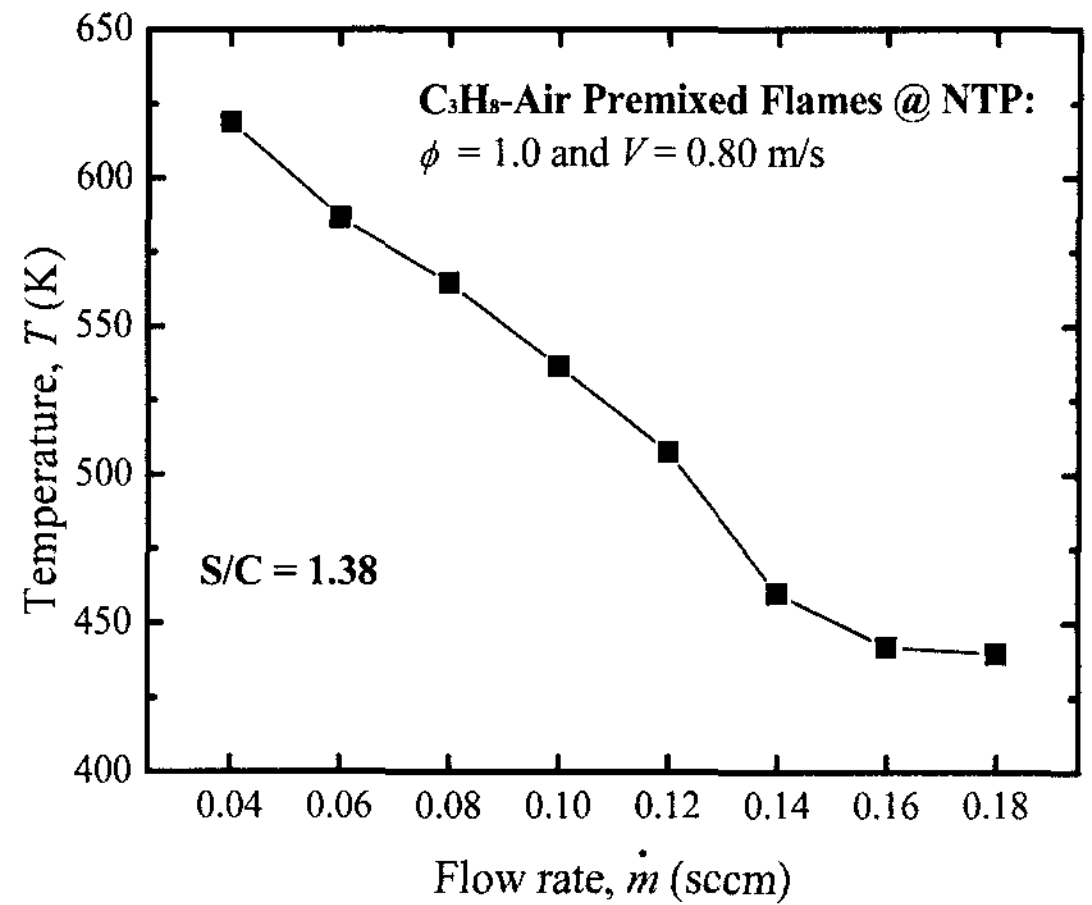


Fig. 9 Measured temperature on the center of the micro reformer wall, as a function of fuel-water mixture flow rate.

유량인 당량비 $\phi = 1.0$, 분사속도 $V = 0.80$ m/s로 정하여 설계된 초소형 연소기에서 가능한 최대 출력을 낼 수 있도록 하였다. 또한 주사기 펌프를 통하여 공급되는 S/C ratio는 메탄올의 완전한 반응을 위해서 이론 비율(1/1)보다 물의 양이 다소 많은 1.38/1⁴⁾의 값을 갖도록 메탄올-물 혼합물의 비율을 조절하였다. 결과적으로 실험의 독립 변수는 메탄올-물 혼합물의 투입량으로 한정시켰다.

위와 같은 실험 조건을 기본으로 외부를 단열시킨 상태에서 메탄올-물 혼합물의 투입량에 따른 리포머 외부 벽면 중심부의 온도를 열전대 시스템을 통하여 측정하였다. 측정된 벽면 온도를 기준으로 리포머 내부 유동상태는 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 사용하여 예측되었다. 측정된 외부 벽면 온도를 기준으로 내부 연소기 벽면의 평균 온도를 UDF 코드를 통한 시행착오 방식으로 구하여 리포머 내부 유동상태를 예측하였다.

Fig. 9는 메탄올-물 혼합물의 투입량에 따른 외부 벽면 중심부의 온도에 대한 측정 결과를 나타낸 것이다. 투입된 메탄올-물 혼합물의 유량범위 0.04-0.18 sccm에서 439.7-618.7 K의 온도분포를 나타내었다. 혼합물의 투입량이 늘어날수록 초소형 연소기로부터 시간당 전달되는 열량이 많아지므로 외부 벽면 중심부의 온도는 선형적으로 낮아

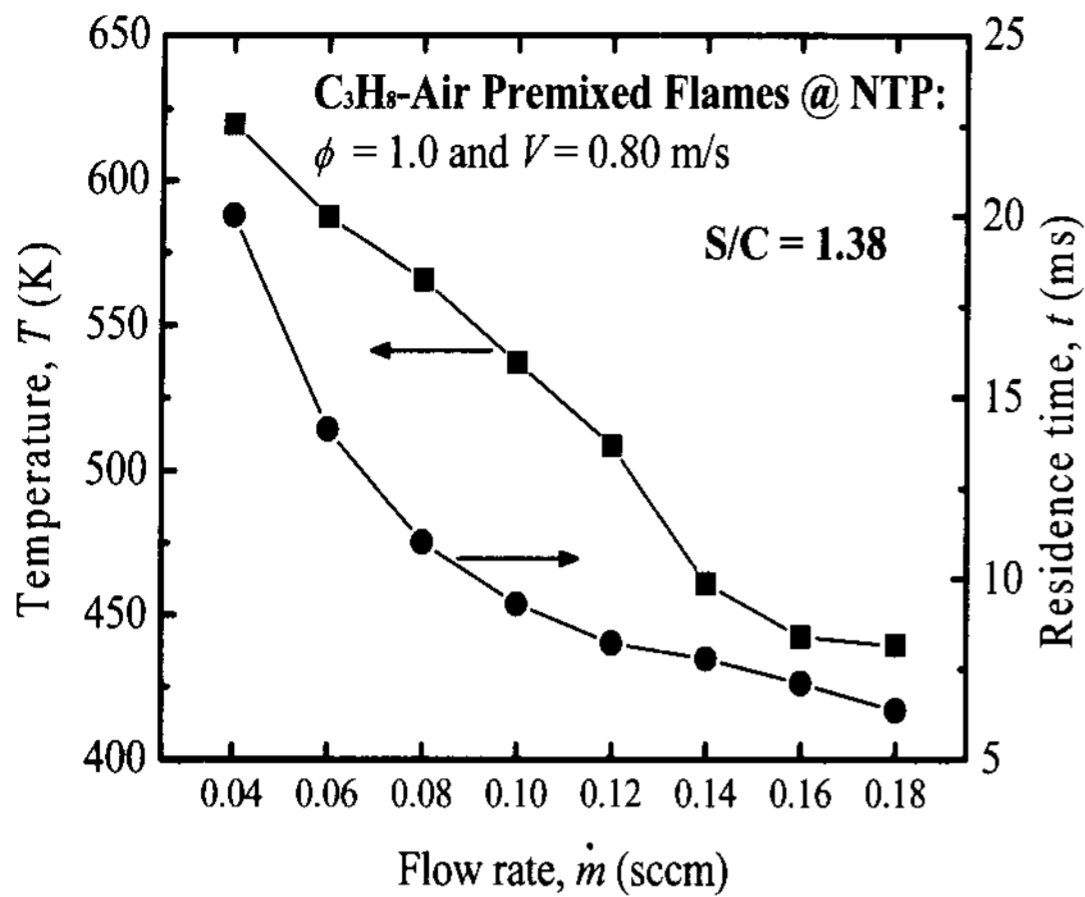


Fig. 10 Predicted temperature and residence time of reforming gas as a function of fuel-water mixture flow rate.

짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9를 기준으로 예측된 리포머 내부 유체의 평균온도와 체류시간을 나타낸 것이다. 체류시간은 내부 유체의 평균속도로부터 산출되었다. 예측된 리포머 내부 유체의 평균 온도는 외부 벽면 중심부의 온도와 거의 유사 했으며 체류시간 역시 그 경향과 일치했다.

3.4 리포밍된 생성가스의 생산율, 변환율 및 성분 분석

Fig. 9와 Fig. 10에 의해 적절 유량범위로 평가 되는 0.04-0.12 sccm의 메탄올-물 혼합물로부터 동일한 실험조건($\phi = 1.0$, $V = 0.80$ m/s, S/C ratio = 1.38)에서 리포밍된 생성가스를 GC(Gas chromatograph, agilent 6890)를 통하여 성분 분석을 하였다. 성분분석의 지표가 되는 표준 샘플가스는 아르곤을 balance로 하여 일산화탄소 10.0%mol/mol, 이산화탄소 40.1%mol/mol로 이루어져 있고, 이것을 기준으로 수소, 일산화탄소, 이산화탄소의 비율을 측정하였다.

Fig. 11은 메탄올-물 혼합물의 투입량에 따른 수소, 일산화탄소와 이산화탄소의 비율을 나타낸 것이다. 투입된 유량에 상관없이 수소가 전체 생성가스에서 차지하는 비율은 거의 일정하지만 투입

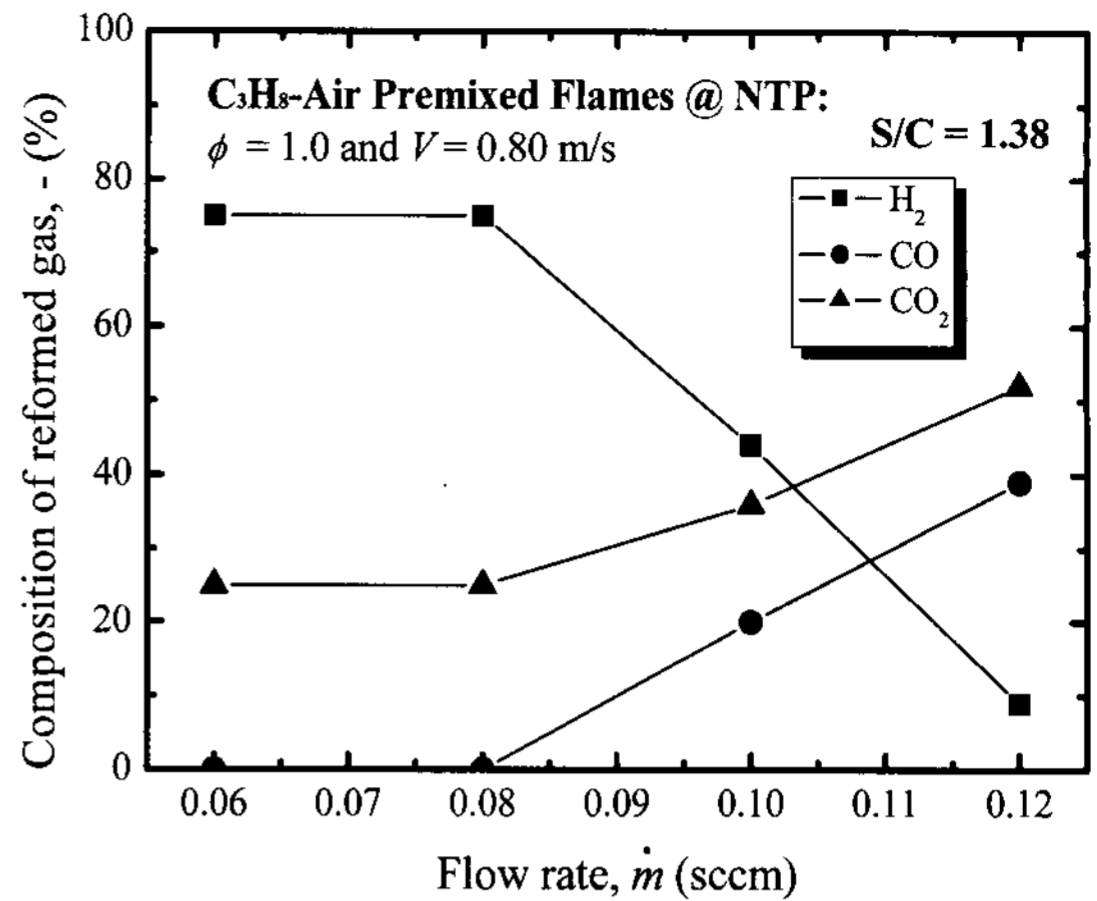


Fig. 11 Composition of reformed gas as a function of fuel-water mixture flow rate.

된 유량이 늘어날수록 일산화탄소의 비율은 늘어나는 것을 알 수 있다. 특히 0.08 sccm 이하에서는 이론적인 생성가스의 비율과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

메탄올-물 혼합물로부터 리포밍된 생성가스의 생산율과 변환율을 Fig. 12에 나타내었다. 생산율은 bubble meter를 통해 측정되었고 변환율은 Fig. 11의 가스 성분과 생산율로부터 계산된 것이다. 결과로부터 투입된 메탄올-물 혼합물의 유량

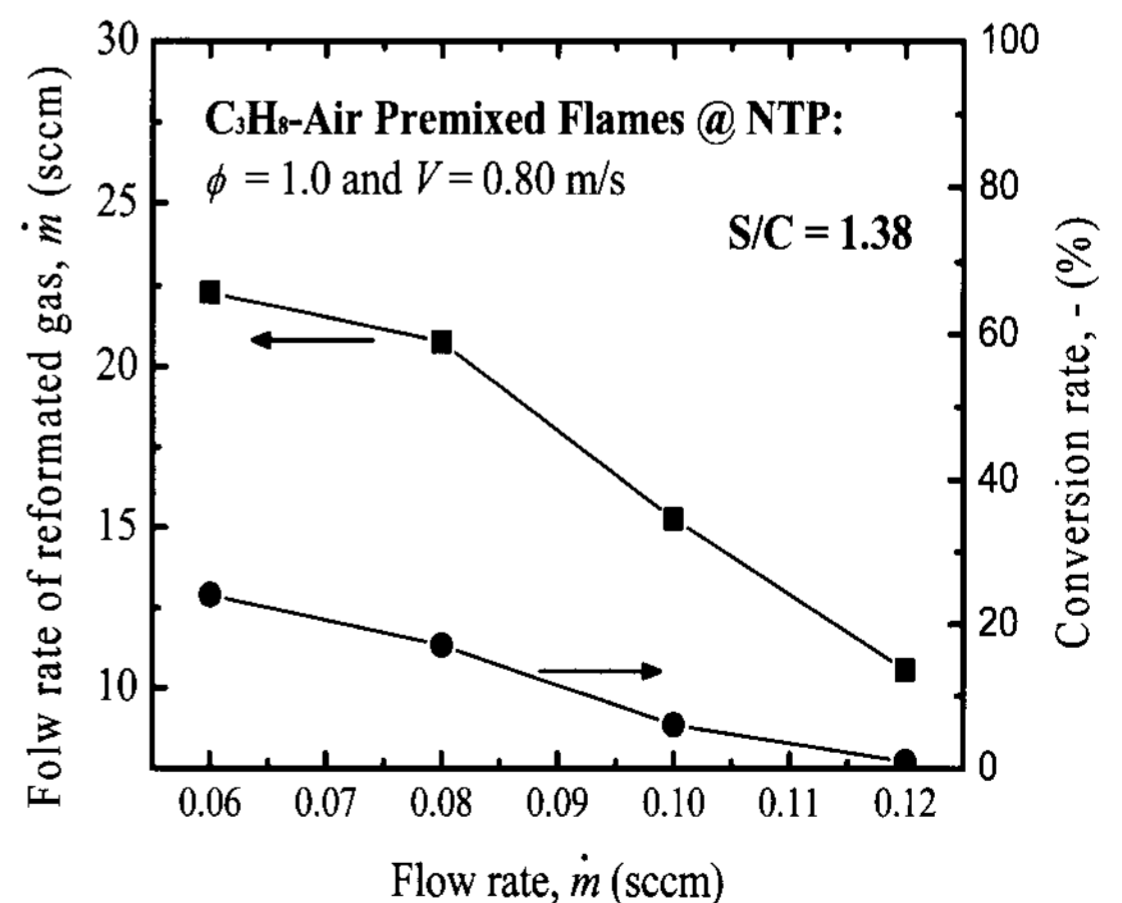


Fig. 12 Flow and conversion rates of reformed gas as a function of fuel-water mixture flow rate.

이 증가할수록 생성가스의 생산율과 변환율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험조건 중 최적 작동조건은 메탄올-물 혼합물의 투입량이 0.06 sccm인 경우로 이 조건에서 리포머 내부 유체의 평균 온도는 587.4 K이고 가스 생산율은 22.3 sccm이며 전체 12%의 효율로 3.61 W(in LHV)의 수소를 생산하였다.

본 연구에서의 실험 조건은 모두 메탄올 스팀리포밍 촉매 반응에 적절한 473-613 K³⁾ 내에서 수행한 것이므로 생성가스의 생산율과 변환율 및 수소의 비율에 리포머 내 가스의 체류시간이 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 설계된 초소형 리포머 시스템에서 이상적인 75%의 수소 비율 및 1% 이하의 일산화탄소 비율을 얻기 위해서는 Fig. 10과 같이 14 ms 이상의 체류시간이 필요한데, 이를 위해서는 리포머 부분과 초소형 연소기 2단의 길이를 늘이거나 리포머 내 micro channel을 생성하여 더 많은 체류시간의 확보가 필요하다.

4. 결 론

수 와트 급의 연료전지에 수소를 공급하기 위한 초소형 리포머 시스템의 설계와 최적 작동 조건을 평가하기 위해서 실험 및 수치해석을 통해 연구하였다. 본 연구에서는 초소형 2단 연소기를 중심으로 환형으로 증발기와 CuO/ZnO/Al₂O₃ 촉매를 사용한 리포머를 결합시킨 형상의 리포머 시스템이 제안되었다. 실험과 수치해석을 통해 도출된 최적 작동조건으로 주어진 실험 조건($\phi = 1.0$, $V = 0.80$ m/s, S/C ratio = 1.38)에서 메탄올-물 혼합물 투입량은 0.06 sccm이다. 이와 같은 조건에서 리포머 내부 유체의 평균 온도는 587.4 K 이고 체류시간은 14 ms 이며 전체 12%의 효율로 3.61 W(in LHV)의 수소를 생산하였다.

후 기

본 논문은 에너지관리공단의 2004년도 에너지

기술학술진흥사업 지원을 받아 연구되었음(과제 번호: 2004-03-0012-0-000).

참 고 문 헌

- 1) Lu G. Q., and Wang C. Y., "Development of micro direct methanol fuel cells for high power applications," J. Power Sources, Vol. 144, 2005, pp. 141-145
- 2) Shioya M., "Expectation of micro fuel cell technology," 2nd Int. Hydrogen & Fuel Cell Expo, Tokyo, Japan, 2006, pp. 69-85
- 3) Shin Y., Kim O., Hong J.-C., Oh J.-H., Kim W.-J., Haam S., and Chung C.-H., "The development of micro-fuel processor using low temperature co-fired ceramic(LTCC)", Int. J. Hydrogen Energy., Vol. 31, 2006, pp. 1925-1933
- 4) Yoshida K., Tanaka S., Hiraki H., and Esashi M., "A micro fuel reformer integrated with a combustor and a microchannel evaporator," J. Micromech. Microeng., Vol. 16, 2006, pp. 191-197
- 5) Fluent Inc., "Fluent 6.2 User's Guide," Fluent Inc., Lebanon, NH, USA., 2005
- 6) Kee R. J., Rupley F. M., and Miller J. A., "The CHEMKIN Thermodynamic Data Base," Report No. SAND87-8215B, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA., 1992
- 7) Hautman D. J., Dryer F. L., Schug K. P., and Glassman I., "A multiple-step overall kinetic mechanism for the oxidation of hydrocarbons," Combust. Sci. Tech., Vol. 25, 1981, pp. 219-235
- 8) Peckner D., and Bernstein I. M., "Handbook of Stainless Steels," McGraw-Hill, New York, NY, USA. 1987, pp. 19.1-19.36
- 9) Kim K. B., and Kwon O. C., "Studies on a two-staged micro-combustor for a

micro-reformer integrated with a micro-evaporator," *J. Power Sources*, Vol. 182, 2008, pp. 609-615

- 10) Piña J., Bucalá V., and Borio D.O., "Optimization of steam reformers: Heat flux distribution and carbon formation," *Int. J. Chem. Reactor Eng.* Vol. 1, 2003, p. A25
- 11) Tonkovich A.Y., Zilka J.L., Jimenez D.M., Lamont M.J., and Wegeng R.S., "Microchannel Chemical Reactors for Fuel Processing", *AICHE Spring National Meeting*, New Orleans, USA, March 9-12, PNNL-SA-29747, 1998