

크기에 따른 스위스 롤 형태 연소기의 성능 변화

오화영* · 김연호* · 허환일** · Paul D. Ronney***

Effects of Size on the Performance of Heat-Recirculating Swiss-roll Combustors

Hwayoung Oh* · Younho Kim* · Hwanil Huh** · Paul D. Ronney***

ABSTRACT

Extinction limits and combustion temperatures in heat-recirculating excess enthalpy reactors employing both gas-phase and catalytic reaction have been examined previously, with emphasis Reynolds number (Re) effects and possible application to microscale combustion devices. However, Re is not the only parameter needed to characterize reactor operation. In particular, the use of a fixed reactor size implies that residence time and Re cannot be adjusted independently. To remedy this situation, in this work geometrically similar reactors of different physical sizes were tested with the aim of independently determining the effects of Re and Da . It is found that the difference between catalytic and non-catalytic combustion limits narrow as scale decreases. Moreover, to assess the importance of wall thermal conductivity, reactors of varying wall thickness were studied. From these results the effect of scale on microscale reactor performance and implications for practical microcombustion devices are discussed.

Key Words : Reynolds number, Damköhler number, Thermal conductivity, Catalytic Combustion

기호설명

Re	Reynolds number	ν	Kinematic viscosity
Da	Damköhler number	w	Channel width
k	Thermal conductivity	ϕ	Equivalence ratio

1. 서 론

일부 정밀기계·전자분야 제조기술은 국제적으로 인정받고 있는 우리나라 역시 기계장치의 소형화라는 세계적인 추세를 따라가게 될 것이며, 이를 위해 가장 중요한 요소로 마이크로 동력발생장치와 연소/추진 장치에 대한 연구가 절실한 실정이다. 현재 선진국에서도 연구가 진행 중인 분야이며, 많은 발전 가능성을 내포하고 있다. 본 연구에서는 현재 개발이 진행되고 있는

연료전지와 결합하여 마이크로 파워를 발생할 수 있는 연소기를 제작하여 연소성능을 파악하는 것에 연구목적이 있다.

일반적으로 탄화수소($\text{Propane} \approx 46.4 \text{ MJ/kg}$) 계열의 연료가 현재 주로 사용되고 있는 리튬이온($\text{Li-ion} \approx 0.5 \text{ MJ/kg}$) 배터리에 비해서 단위 질량당 에너지 밀도가 대략 100배 높은데 이는 탄화수소 연료를 사용하여 같은 양의 에너지를 발생시킬 수만 있다면 질량의 1%만 사용해도 현재의 리튬이온 배터리와 같은 효과를 얻을 수 있으며 100%를 모두 사용할 경우 현재에 비해 100배의 효율[1]을 얻을 수 있다는 점으로 휴대용 전기장치와 배터리를 이용한 모든 장치들에 이를 적용할 경우 엄청난 효과를 볼 수 있을 것이다. 하지만 이를 위해서는 장치의 소형화가 필수적이

* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

** 충남대학교 항공우주공학과

*** University of Southern California, USA

† 연락처자, hwanil@cnu.ac.kr

지만 그에 따른 열과 마찰손실의 영향이 매우 중요한 인자로 작용되기 때문에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 수많은 외국의 연구기관 및 학교에서는 이미 30년 전부터 이를 해결하기 위한 열적, 열전기적, 압전기적, 초전기적 물질[2, 3]에 대한 연구를 진행 중이며 궁극적으로 연료전지와 연소기를 결합하여 새로운 방식의 마이크로 동력을 발생하는데 목적이 있다. 몇몇 연구자[4, 5]들은 역류 유동이 없는 일직선 채널의 연소기를 제작하여 실험을 수행하였는데 이 경우 채널의 벽면을 따라 진행되는 열전도에 의해 주로 영향을 받기 때문에 벽면을 나눠 놓은 나선형 역류 연소기와는 달리 기본적으로 효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 남가주대학(USC)에서 진행한 선행 연구[6]에서는 외형 크기를 고정한 상태에서 스위스 롤 형태의 나선형 연소기를 설계, 제작하여 광범위한 레이놀즈수($1 < Re < 2000$) 영역에서 연소기의 재질과 두께 및 공급 연료를 달리 사용하여 실험을 수행하였다. 선행 연구 결과 연소기 재질의 열전도도가 낮고, 재질의 두께가 얕을수록 연소기의 성능이 좋아진다는 결론을 얻을 수 있었다. 그리고 Fluent를 이용한 이론적 해석을 통해 분석한 결과[7, 8]와 실험 결과를 비교하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 연소기의 크기에 따른 효과를 살펴보기 위해 가장 성능이 좋았던 티타늄 (열전도율(k) ≈ 6.0 W/mK) 재질을 선택하여 기존의 연소기에 비해 크기는 1/2로, 부피는 1/4로 축소한 연소기를 설계, 제작하여 가스 및 촉매 연소 실험을 통해 연소기의 성능을 평가하는 실험을 수행하였다.

2. 실험장치

Titanium-811 합금을 이용하여 Fig. 1과 같은 회전수 3.5인 스위스 롤 연소기를 설계하였다. 기준이 되는 연소기는 가로, 세로, 높이가 각각 9 cm, 9 cm, 5 cm이고, 재질의 두께는 0.5 mm, 채널 폭은 5 mm이며, 절반 크기의 연소기는 외형 크기가 각각 4.5 cm, 4.5 cm, 5 cm에 재질의 두께는 0.25 mm, 채널 폭은 2.5 mm이며, 제작된 형상은 Fig. 2와 같으며 Titanium-811 합금의 재질구성은 다음 Table 1과 같다.

Table. 1 Material properties

Product	Name	Titanium-811
Ingredients	Base metal	Ti
	Alloying metal	Al, V, Fe, Mo, Sn, Zr, Mn, Ta, Cr, Cu, Ni
Physical data	Condition	Solid
	Appearance	Gray metallic
	Melting point	1560~1840 °C

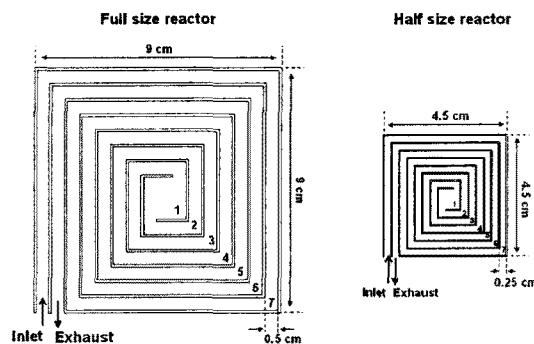


Figure 1. Schematic diagrams of Swiss roll reactors. Left: full-scale reactor, right: half-scale reactor.

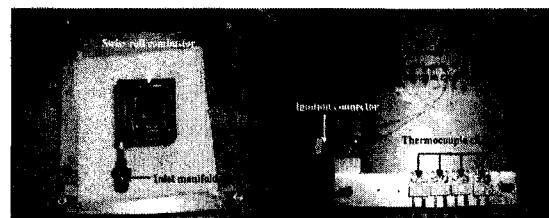


Figure 2. Fabricated configuration of the half scale Swiss roll reactor

연소기 제작 시 가장 중요한 요소는 열손실을 줄이는 것으로, 이를 위해 연소기의 상·하(Fig. 2)에 사용한 알루미늄 판위에 6 mm 이상의 세라믹 단열재를 장착하였으며, 세라믹 단열재 사이에는 역시 단열효과가 있는 세라믹 접착제를 사용하여 단열재와 알루미늄 판을 고정하였다. 그리고 연소기 내부에서 각 채널별로 온도를 측정하기 위해 R-type thermocouple을 7개 부착하였으며, 연소기의 중앙에 초기 연소를 위한 점화 장치를 장착하였다.

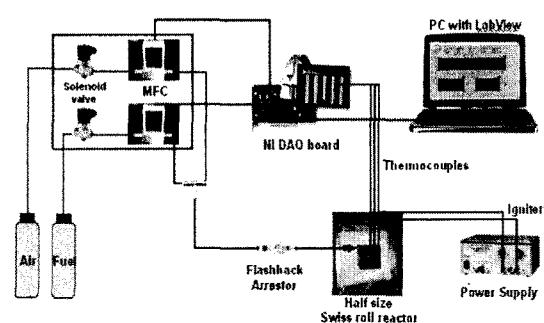


Figure 3. Schematic of experimental apparatus

Figure 3에서 볼 수 있듯이 실험을 위한 기본 장비는 솔레노이드 밸브, 유량을 제어하기 위한

유량제어장치(2 ea), 가스의 역류를 방지하기 위한 역화방지장치, 데이터 수집과 실험 조정을 위한 NI DAQ board와 LabVIEW 프로그램, 점화장치를 구동시키기 위한 전원공급장치로 구성되어 있다. 또한 연소를 위한 연료로 프로판(C_3H_8)과 공기의 혼합 가스를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소염한계 (Extinction limits)

Figure 4는 두 연소기의 가스 및 측매 연소 실험 결과이다. 과농(fuel rich)과 희박(fuel lean) 영역에서의 각 지점은 안정영역에서부터 점화를 시켜 프로판과 공기를 혼합시킨 가스 연료의 농도와 공급유량을 달리하여 당량비와 레이놀즈수를 변화시키며 연소기 내부의 온도가 대기온도로 떨어진 지점을 찾아 표시한 것으로 이 부분을 소염한계로 정의하였다. 측매연소를 위해 백금을 사용하였으며 실험에 사용하기 전 30분 이상 암모니아와 공기의 혼합가스로 열처리를 한 후 사용할 경우 연소기의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 가스 연소 실험에서 기존의 연소기의 경우 레이놀즈수 약 40 이하에서는 소염되었으나 크기를 절반으로 줄인 연소기의 경우 레이놀즈수 25 정도에서도 연소가 이루어지는 것을 알 수 있었다. 하지만 측매연소의 경우 기존의 연소기는 Re 수 1 까지 연소가 유지되었으나 크기를 줄인 연소기의 경우는 Re 수 3.5 이하에서는 연소가 소염되는 것을 확인하였다.

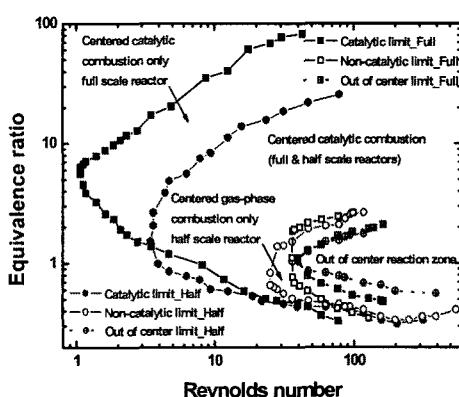


Figure 4. Extinction limit map for catalytic and gas-phase combustion in the full-scale and half-scale titanium Swiss roll reactors with propane fuel (wall thicknesses are 0.5 mm and 0.25 mm for the full-scale and half-scale reactors, respectively.)

연소기의 외형 크기와 채널 폭 그리고 재질의 두께를 변화시킨 스위스를 형태 나선형 연소기의 경우 기존 연소기에 비해 가스연소 시 더 적은 유량에서도 연소가 가능한 것으로 판단되어 성능이 오히려 향상됨을 알 수 있었다.

3.2 온도 특성 (Thermal behavior)

Figure 5는 레이놀즈수의 변화에 따른 두 연소기의 소염 직전 온도를 기록한 것으로 특히 주목할 점은 측매 연소기의 온도 부분이다. 프로판 가스의 발화 온도는 500 °C 이상에서 진행되는데 측매 연소 시 Re 수 10 이하에서 연소기 내부 온도가 100 °C 이하에서도 연소가 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 기존 연소기의 경우 크기를 줄인 연소기의 경우 레이놀즈수가 증가하면서 소멸온도도 높아지는 것을 볼 수 있다.

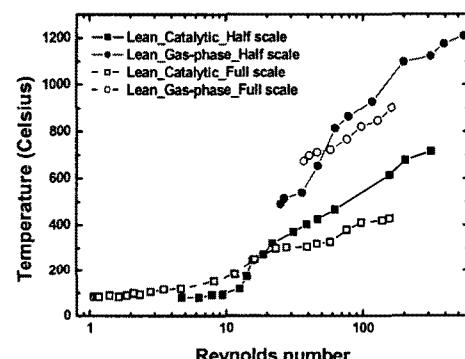


Figure 5. Maximum temperature at the lean extinction limits for gas-phase and catalytic combustion, for full-scale and half-scale reactors.

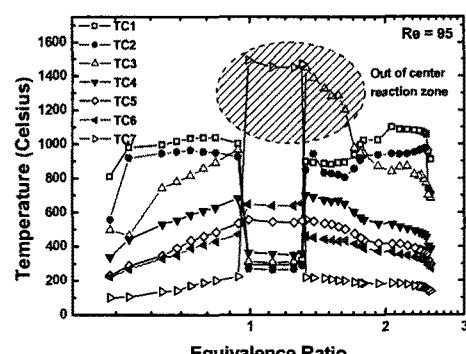


Figure 6. Temperature profiles over a range of mixture compositions for gas-phase combustion at $Re = 95$ for the half-scale reactor.

Figure 6은 Re 수 95인 지점에서 크기를 축소한 연소기 내부에 장착한 7개의 온도센서에서 측정한 온도 변화를 기록한 것이다. 주목할 점은 연료 과농, 회박 지점에서는 연소기의 중앙에 위치한 TC1의 온도가 가장 높은 온도(T_{max})로 기록되었으나 당량비가 1인 지점(Stoichiometric)에 가까워질수록 연소영역이 연료가 유입되는 채널로 움직여서 처음에는 TC3의 온도가 중앙의 온도보다 높아진 후 당량비 1 근처의 지점에서는 인젝터와 가장 인접한 바깥 채널인 TCT의 온도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 연소영역이 움직였을 뿐 소염되지 않고 오히려 온도가 1500 °C 이상으로 증가하였고, 이 부분에서 연소가 중앙에서 벗어나 형성된다고 해서 "Out of center reaction zone"이라고 정의하였으며, 아래의 Fig. 7은 이때의 연소기 외부 형상을 촬영한 것이다. 모든 영역에서 "Out of center reaction zone"이 형성되는 것은 아니고 일정 레이놀즈수 이상에서 형성되는데, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 Re 수 26 인 지점에서 온도 형상을 보면 Stoichiometric 상태에서 여전히 중앙에 위치한 TC1의 온도가 가장 높음을 확인할 수 있다.

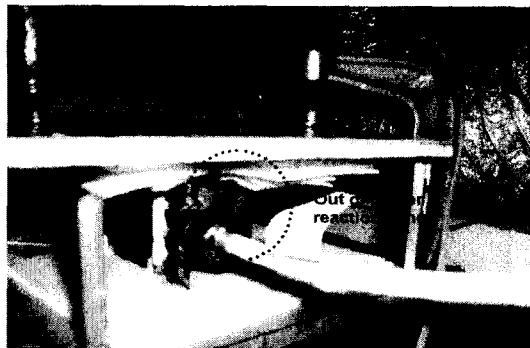


Figure 7. Out of center reaction zone configuration

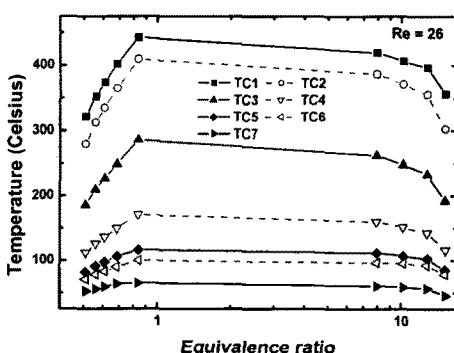


Figure 8. Temperature profiles over a range of mixture compositions for catalytic combustion at $Re = 26$ for the half-scale reactor.

4. 결 론

연소기의 크기변화에 따른 성능을 평가하기 위해 2개의 연소기를 제작하여 가스 및 촉매연소 실험을 수행하였다. 가스연소의 경우 당량비(ϕ) 1 근처 지점을 기준으로 과농과 회박영역이 대칭의 형태를 이루었으나, 촉매연소의 경우는 과농영역에 기준지점이 형성됨을 알 수 있었다. 기존의 연소기의 경우 연소가 유지되는 최소 레이놀즈수 영역이 촉매연소는 Re 수 1, 가스연소는 Re 수 36에 형성되었고, 절반 크기의 연소기는 촉매연소는 Re 수 3.5, 가스연소는 Re 수 25까지 유지되었다. 실험결과 주목할 점은 크기의 변화를 줄였을 때 가스와 촉매연소 사이의 간격이 줄어드는 것을 볼 수 있었는데 만약 충분히 작은 크기의 연소기를 제작한다면 이 두 영역이 만날 수도 있다는 점을 감안하여 향후 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구지원(과제번호: KOSEF R01-2003-000-11735(2005))과 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(과제번호: KRF-2005-213-D00024)의 지원을 받아 수행된 연구 결과의 일부이며 연구비를 지원해 주신 재단에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] A.C. Fernandez-Pello, *Proc. Combust. Inst.*, 29, 2002, pp. 883-899.
- [2] S.A. Lloyd, F.J. Weinberg, *Nature* 251, 1974, pp. 47-49.
- [3] S.A. Lloyd, F.J. Weinberg, *Nature* 257, 1975, pp. 367-370.
- [4] D.G. Norton, D.G. Vlachos, *Combust. Flame* 138, 2004, pp. 97-107.
- [5] T.T. Leach, C.P. Cadou, *Proc. Combust. Inst.* 30, 2005, pp. 2437-2444.
- [6] J. Ahn, C. Eastwood, L. Sitzki, P. D. Ronney, "Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners," *Proc. Combust. Inst.* 30, 2005, pp. 2463-2472.
- [7] Ronney, P. D., "Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors," *Combustion and Flame* 135, 2003, pp. 421-439.
- [8] C.-H. Kuo, P. D. Ronney, "Numerical Modeling of Heat Recirculating Combustors," to appear in *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, 2006.