

폴리이미드 재질의 소형 플라스틱 연소기의 크기에 따른 특성 연구

신강창* · 허환일** · Paul D. Ronney***

Study of scale on small polyimide combustor performance

Kangchang Sin* · Hwanil Huh** · Paul D. Ronney***

ABSTRACT

Micro power generators have been studying to provide high power that micro systems require. Micro power generators need micro combustor. Swiss-roll combustor has been studied about scale, geometry, material. From previous study experiments have shown that swiss-roll combustors require thin walls with low thermal conductivity for maximum performance at small scales. In this work, polyimide combustors with low thermal conductivity and thin thickness are built and tested.

초 록

MEMS 기술의 발전에 따라 마이크로 시스템이 개발되면서 마이크로 시스템이 요구하는 높은 에너지를 제공하는 에너지원으로 연소기반의 초소형 동력장치에 대한 연구가 진행되고 있다. 초소형 동력장치는 별도의 열원이 있어야 하기에 이와 연계되는 초소형 연소기가 필요하다. Swiss-roll 연소기는 연소기의 크기와 형상, 재질에 대한 연구들이 진행되어 왔다. 선행연구결과 연소기 재질의 열전도도가 낮고, 재질의 두께가 얇을수록 연소기의 성능이 좋아진다는 결론을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 낮은 작동온도를 요구하는 PEM형 연료전지에의 적용가능성을 검토하기 위해서 열전도율이 낮은 polyimide 연소기를 제작하여 성능분석을 수행하였다.

Key Words: Swiss-roll Combustor(스위스롤 연소기), Scale Effect(스케일 효과), Polyimide(폴리이미드), Kapton(캡톤)

1. 서 론

최근 각종 기계시스템의 소형화와 마이크로

시스템의 개발되면서 마이크로 시스템의 실용화를 위해 기존의 이차전지가 제공하는 것보다 높은 에너지를 제공하는 동력장치에 대한 필요가 요구되고 있다. 이러한 요구에 대한 대응으로 이차전지의 성능개선이 꾸준히 이루어지고 있지만, 보다 높은 에너지 밀도를 갖는 동력장치로 연소기반의 초소형 동력장치에 대한 연구가 진행되

* 충남대학교 대학원 항공우주공학과

** 종신회원, 충남대학교 항공우주공학과

*** University of Southern California, USA

연락처, E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

고 있다. 일반적으로 탄화수소(Propane ≈ 46.4 MJ/kg)계열의 연료는 현재 사용되고 있는 리튬이온(Li-ion ≈ 0.5 MJ/kg) 배터리에 비해서 단위질량당 에너지 밀도가 대략 100배 높는데 이는 탄화수소 연료를 사용하여 같은 양의 에너지를 발생시킬 수만 있다면 질량의 1%만 사용해도 현재의 리튬이온 배터리와 같은 효과를 얻을 수 있기 때문에 연소에 기반을 둔 다양한 형태의 초소형 동력장치 개발이 시도되었다[1]. 이러한 연소기반의 초소형 동력장치로는 내연기관, 열전소자, 그리고 연료전지가 있다. 내연기관 동력장치로는 MIT의 마이크로 가스터빈, UC Berkeley의 마이크로 로타리 엔진, Georgia Tech의 Free piston 엔진 등이 포함된다. 열전소자 동력장치는 일정 온도를 유지시켜야 하기 때문에 열전소자와 연계하여 초소형 연소기가 필요하다. 연료전지는 연료인 수소를 원활히 공급해주기 위한 연료개질기와 개질기의 열원인 연소기가 필요하다. 초소형 개질기용 열원으로 촉매연소기와 과산화수소분해 반응기가 연구되고 있다[2].

그런데, 마이크로 연소기 기술 개발에 있어 가장 큰 문제점은 연소기 크기 감소에 따라 화염이 존재하는 연소실의 표면/공간의 비가 증가하여 화염의 소화를 일으키고 가연 범위가 축소된다는 것이다[3].

이와 같은 연소의 일반적 한계를 극복하고 연소기의 소형화를 이루기 위한 방안으로 Swiss-roll 형태의 연소기가 개발되고 있다. Swiss-roll 연소기는 고온의 연소가스의 열을 회수하여 미연가스의 온도를 상승시킴으로써 가연 한계를 증대하는 방법의 연소기로 연소기의 크기와 형상, 재질에 대한 연구들이 진행된 바 있다. 미국의 남가주대학(USC)에서는 외형 크기를 고정된 상태에서 스위스롤 연소기의 재질과 두께 및 크기에 대한 성능 분석 연구를 진행하였다[4]. 그 결과 티타늄(열전도율(κ) ≈ 6.0 W/mK)재질의 연소기를 사용하였을 때 성능이 가장 좋았으며 크기를 기존연소기의 1/2로 줄였을 경우 연소기 성능이 소폭 감소하였지만 단위 부피당 성능은 소폭 증가하였음을 보인다[5,6].

선행연구결과를 통해 연소기 재질의 열전도도

가 낮고, 재질의 두께가 얇을수록 연소기의 성능이 좋아진다는 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 PEM형 연료전지에의 적용 가능성을 검토하기 위해 폴리이미드 재질의 연소기를 제작하고 백금(Pt) 촉매체를 이용하여 낮은 온도영역에서의 연소특성을 살펴보는 것을 목표로 한다.

2. 실험장치

실험에서 사용된 연소기의 재질은 polyimide의 한 종류인 Kapton으로 매우 낮은 열전도율(열전도율(κ) ≈ 0.12 W/m $^{\circ}$ C)을 가지고 있다. Titanium연소기의 경우 재질의 특성상 사각형으로 제작하여야 하였지만, polyimide연소기의 경우 두께가 얇고 변형이 자유로워 사각으로 제작하기에는 어려움이 있어 원형으로 제작하였다. 재질의 두께는 0.15 mm, 높이는 50 mm, 채널폭이 2.5 mm인 연소기와 두께와 높이는 동일한 조건에, 채널폭은 1.6 mm인 연소기를 제작하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 연소기의 외형과 내부를 나타낸 모습이다.

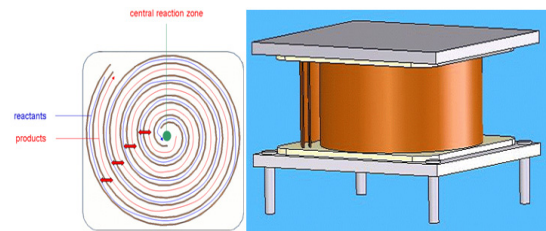


Fig. 1. Swiss-roll combustor for experiment

연소기 제작 시 가장 중요한 요소는 열손실을 줄이는 것으로, 이를 위해 연소기의 상·하에 사용한 알루미늄 판위에 6 mm 이상의 세라믹 단열재를 장착하였으며, 세라믹 단열재 사이에는 역시 단열효과가 있는 세라믹 접착제를 사용하여 단열재와 알루미늄 판을 고정하였다. 그리고 연소기의 중앙에 온도를 측정하기 위해 K-type thermocouple을 부착하였으며, 초기 연소를 위한 점화장치를 장착하였다.

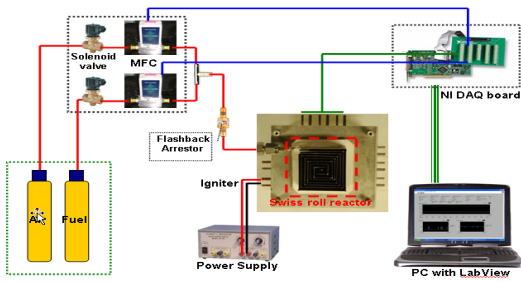


Fig. 2. Schematic of experiment system

Figure 2에서 볼 수 있듯이 실험을 위한 기본 장비는 솔레노이드 밸브, 유량을 제어하기 위한 유량제어장치, 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), 산화제로 공기를 이용하여 연료/공기 혼합 가스를 사용하였다. 연소방식으로는 촉매연소를 이용하였다. 촉매연소는 저온에서도 반응을 완료하기 때문에 연소기의 온도를 낮게 유지할 수 있으며, 이를 통해 주위로의 열전달을 최소화 할 수 있다. 또한 polyimide가 견딜 수 있는 온도는 $400\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 로 가스상태 연소인 경우 모든 연소 조건에서 연소열이 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 가 넘어 재질이 녹을 우려가 있으나, 촉매연소는 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 보다 낮은 온도영역에서 연소를 유지시키기에 실험에 적합하다. Fig. 3에서 살펴보면 촉매연소의 경우 장시간 연소에 의한 생성물이 촉매 표면을 덮고 있어 효율저하의 원인이 됨을 알 수 있다. 이는 연소 과정 중 30분 이상 암모니아와 공기의 혼합 가스로 열처리를 한 후 사용하면 연소기의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

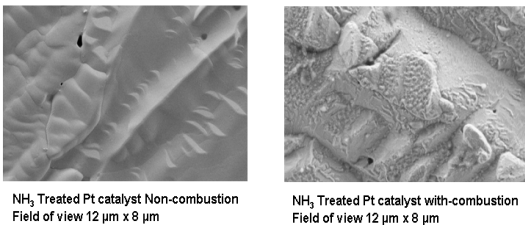


Fig. 3. SEM capture Pt catalyst surface

3. 결과 및 고찰

3.1 소멸 한계(Extinction limits)

Figure 4는 연소기 크기에 대한 효과를 살펴하기 위한 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 소멸한계로 정의하였다. 결과를 살펴보면 채널 폭을 반으로 줄인 연소기의 연소가능영역이 채널 폭이 큰 연소기에 비해 좁다는 것을 알 수 있다. 또한 소멸한계곡선이 당량비 1을 기준으로 위쪽으로 치우친 경향을 살필 수 있다. 이는 과농 영역에서 연소상태가 안정적이며, 희박 영역에서는 그렇지 못하다는 것을 의미한다.

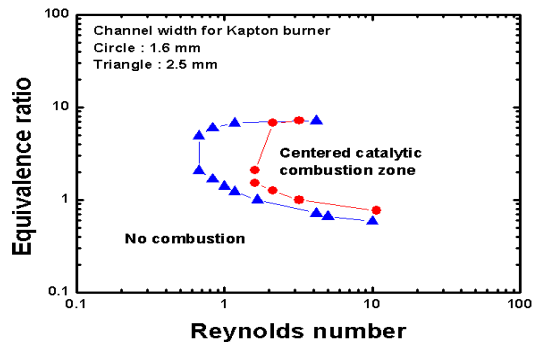


Fig. 4. Extinction Limit using Propane on Kapton combustor

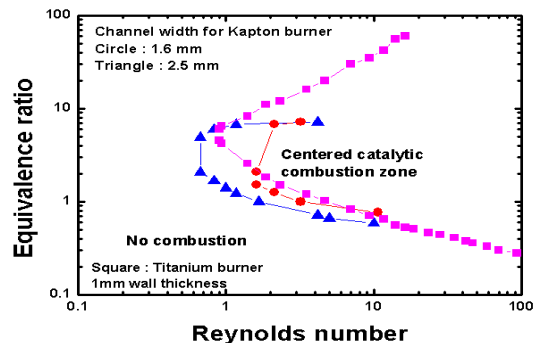


Fig. 5. Extinction Limit on Kapton and Titanium combustor

Figure 5에서는 열전도율에 따른 연소기 특성을 살피기 위해 Titanium연소기의 소염한계결과와 비교하였다. 실험결과 열전도율이 높은 연소기가 연소를 유지하기 위해서는 연료의 양이 더 필요하다는 것을 알 수 있다. 또한 레이놀즈수를 살펴보면 폴리이미드 연소기가 연소 영역이 더 넓고 이는 연소기의 성능이 폴리이미드가 더 좋다는 것을 의미한다.

3.2 온도 특성(Thermal behavior)

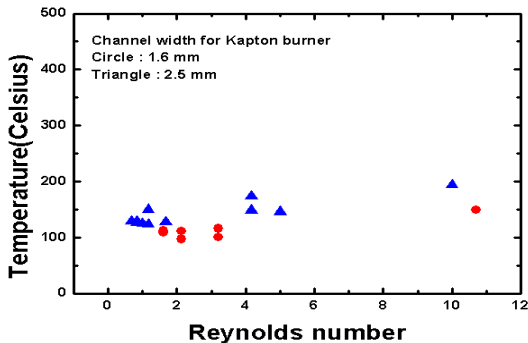


Fig. 6. Maximum temperature at the extinction limits for Kapton combustors

Figure 6은 레이놀즈수의 변화에 따른 연소기의 소염 직전 온도를 기록한 것이다. 프로판 가스의 발화온도는 500 °C 이상에서 진행되는 데 촉매 연소시 200 °C 이하에서도 연소가 형성되는 것을 볼 수 있다. 또한 레이놀즈수가 증가하면서 소염온도도 높아지는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

초소형 열동력 장치의 열원에의 적용을 위하여 Swiss-roll 연소기를 열전도율과 크기에 따른 성능평가를 위한 실험을 수행하였다. 두 개의 연소기를 사용하여 크기에 대한 효과와 열전도율에 대한 효과를 살펴보았다. 열전도율이 낮은 polyimide 특성상 화염 근처에 국부적으로 높은 온도를 유지할 수 있어서 화염으로부터의 열손실을 억제함으로써 가연한계를 확대한 것으로

판단된다. 채널폭이 1.6 mm인 연소기가 채널폭이 2.5mm인 연소기에 비해 소염한계범위가 더 좁은 것을 보아서는 연소기의 크기에 의해 열재생 효과가 감소된 것으로 판단된다. 즉 연소기의 채널 폭이 감소하면서 화염의 온도 또한 감소하였기 때문에 화염의 소염을 억제하기에 충분한 열량이 연소공간에 공급되지 않았다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2007년 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음.(KRF-2007-314(사업코드)-D00033(과제번호)), (KRF-2007-612-D00085)

참 고 문 헌

- Lloyd, S. A. and Weinberg, F.J., "A burner for mixtures of very low heat content," *Nature* 251, 1974, pp. 47-49
- 권세진, "초소형 열동력 장치의 열원 마이크로 연소기", *기계와 재료*, 제19권 3호, 2007, pp. 41-49
- Kim, N.I., Kataoka, T., Maruta, K., and Maruyama, S., "Flammability limits of stationary flames in tubes at low pressure," *Combust. Flame* 141, 2005, pp. 78-88
- 오화영, 김연호, 허환일, "크기에 따른 스위스롤 형태의 연소기의 성능 변화," 제33회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2006.10., pp. 46-49,
- Ahn, J.M., Eastwood, C., Sitzki, L., and Ronney P.D., "Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners," *Proc. Combust. Inst.* 30, 2005, pp. 2463-2472
- Ronney, P.D., "Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors," *Combust. Flame* 135, 2003, pp. 421-439