

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.3.237

# 감광유리를 이용한 MEMS 촉매 연소기의 제작 및 성능 평가

진 정 근\* · 권 세 진†

(2008년 3월 19일 접수, 2009년 2월 2일 수정, 2009년 2월 10일 심사완료)

## Fabrication and Performance Test of MEMS Catalytic Combustors Using Photosensitive Glass Wafer

Jungkun Jin and Sejin Kwon

**Key Words :** Micro-Catalytic Combustor(마이크로 촉매 연소기), Photosensitive Glass(감광유리), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Washcoating(알루미나 워시코트), Ceramic Foam(세라믹 폼), Sol-Gel(졸겔)

### Abstract

MEMS catalytic combustors were fabricated to use in micro-power sources as a heat source. The combustor was fabricated by photolithography and anisotropic wet etching of photosensitive glass wafers. Two different catalyst loading methods were used to complete the fabrication of the combustors. For thin film type, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was washcoated on the surface of the combustion chamber as a catalyst support, and for packed-bed type, ceramic foam was inserted after Pt was coated. The volume of the combustors was 1.8 cm<sup>3</sup> and 16W of heat was generated using the fabricated combustors with hydrogen. The energy density of combustor was about 8.9 W/cm<sup>3</sup>.

### 1. 서 론

초소형 연소기는 초소형 동력원의 열원으로서 활발히 연구되어 왔다. 연소기 기반의 초소형 동력원은 고에너지 밀도의 동력원으로서 기존의 2차 전지를 대신하여 마이크로 시스템의 동력원으로 사용될 수 있다. 이를 통해 마이크로 시스템은 다양한 기능의 장시간 구현이 가능해 진다.<sup>(1)</sup>

연소기에 적합한 연소 반응 메커니즘 선정은 연소기 개발에 있어서 가장 중요한 부분에 해당한다. 문헌에 따르면 기존의 화염 연소를 초소형 연소기에 적용할 경우 높은 표면적 대 체적비로 인해 표면적의 영향이 증가하여 외부로의 과도한 열손실 혹은 표면 결함에 의한 라디칼 소멸로 인해 연소

반응이 불안정하거나 쉽게 소멸(quenching)이 발생한다고 보고되고 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 이를 해결하기 위해 많은 연구자들이 swiss-roll 형태의 연소기와 같이 열손실을 줄이고 연료의 예열효과를 얻을 수 있는 연소기에 대한 연구를 수행하였다.<sup>(3,4)</sup> 그러나 점화기 등의 별도의 구성 요소가 요구되어 구성 및 제작이 복잡하다는 단점이 있다.

촉매 연소는 초소형 연소기에서의 이러한 화염 연소의 단점을 보완할 수 있는 연소 메커니즘으로 주목받고 있다. 촉매 연소는 표면에 분포한 촉매 활성점에 의해 반응이 일어나기 때문에 표면적 대 체적비가 큰 초소형 연소기에서 표면적을 효과적으로 사용할 수 있다. 또한 열손실에 있어서도 화염 연소에 비해 상대적으로 낮은 온도에서도 반응이 유지되며 화염이 없기 때문에 안정적으로 연소 반응을 유지할 수 있다는 장점이 있다.<sup>(1)</sup>

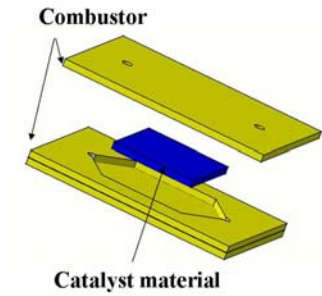
초소형 촉매 연소기에 대한 연구는 그 동안 주로 기판 위에 마이크로 채널을 형성하고 채널 표면에 지지체 및 촉매를 코팅하는 방식<sup>(5-7)</sup>이나 파우더나 펠렛 형태의 촉매 물질을 연소 챔버에 충전하는 방식으로 제작되어 왔다.<sup>(8,9)</sup>

\* 회원, KAIST 대학원 항공우주공학전공

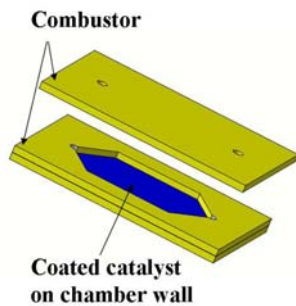
† 책임저자, 회원, KAIST 대학원 항공우주공학전공

E-mail : trumpet@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3721 FAX : (042)350-3710



(a) Packed bed type (Type A)



(b) Thin film type (Type B)

**Fig. 1** Micro combustors with different catalyst loading methods

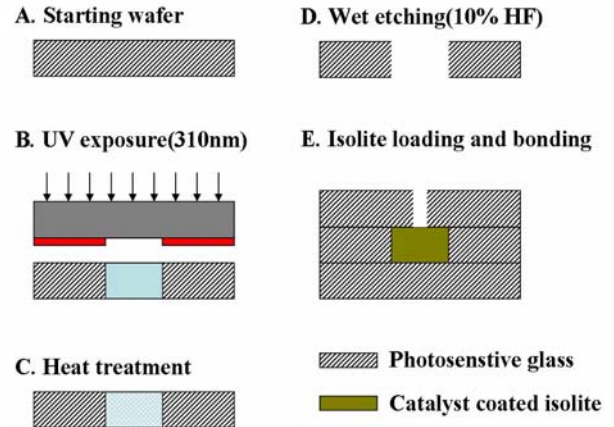
이러한 방식은 발열량이 적은 연소기에는 적합하지만 다소 높은 발열량의 경우 공급되는 연료 및 산화제의 유량이 많아 적합하지 않다. 연소기 재료로는 주로 실리콘 웨이퍼나 금속을 사용하였으나 이러한 재료들은 가공 공정이 비싸고 복잡하며 최종 접합 공정이 어렵다는 단점이 있다. 특히 실리콘 웨이퍼의 경우 연소 챔버의 높이를 500  $\mu\text{m}$  이상으로 할 경우 공정에 많은 어려움이 있다.

이 연구에서는 감광 유리 (photosensitive glass)를 이용하여 연소기를 제작하였다. 감광 유리는 고종횡비의 구조물을 포토리소그래피(photo-lithography)와 이등방성 습식 식각(anisotropic wet etching)을 이용하여 쉽게 제작할 수 있다는 장점이 있다.<sup>(10)</sup> 또한 열을 가하는 열접합 방식을 사용하여 쉽게 각 층을 접합할 수 있다는 장점이 있다. 이 연구에서는 촉매 삽입 방식을 달리하여 두 가지 다른 형태의 초소형 연소기를 제작하였으며 수소 촉매 연소를 이용하여 연소기 성능 평가를 수행하였다.

## 2. 연소기 제작 및 실험 장치 구성

### 2.1 촉매 삽입 방식 선정

연소기 제작에 있어서 재료 및 가공 공정과 함께 적절한 촉매 삽입 방식의 선정 역시 중요하다.



**Fig. 2** Fabrication process of packed-bed type micro combustor using photosensitive glass wafer

이를 위해 이 연구에서는 두 가지 다른 형태의 촉매 삽입 방식을 사용하였다. Figure 1은 이 연구에서 제작한 두 가지 형태의 연소기의 형상을 나타내고 있다. 먼저 팩베드(Packed bed) 형태의 연소기는 구조물 형태의 다공성 지지체에 촉매를 코팅하고 이를 연소기 내부에 삽입하는 방식으로 제작한다. 이 연구에서는 최<sup>(11)</sup> 등이 사용한 세라믹 폼의 일종인 Isolite™ B5를 지지체로 사용하였다.

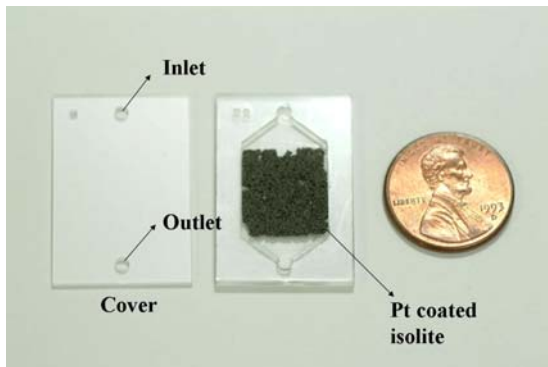
또 다른 방식으로 마이크로 채널을 이용한 촉매 연소기에 널리 사용되고 있는 표면 코팅 형태의 연소기를 제작하였다. 이 연소기는 연소 챔버 표면에  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 코팅하여 박막 형태의 다공성 지지체 층을 형성하고 지지체에 촉매를 코팅하는 방식으로 제작된다.

### 2.2 감광 유리를 이용한 연소기 제작

감광유리를 통한 구조체 가공은 크게 Cr 마스크 패턴 형성, 노광, 열처리, 식각 공정의 순으로 구성된다. 이 연구에서는 감광유리 노광 공정에 적합하도록 500  $\mu\text{m}$  두께의 퀴즈(quartz) 웨이퍼 위에 1500Å의 Cr 층을 스퍼터링을 이용하여 증착하고 리소그래피 공정을 통하여 패턴을 형성하였다. 제작된 Cr 마스크와 감광유리를 이용한 Type-A 연소기 제작 공정을 Figure 2에 제시하였다. 감광유리에 이미 제작된 Cr 마스크를 이용하여 310nm 파장의 자외선을 감광유리에 노광한다. 다음으로 열처리 공정을 수행하고 10% HF 수용액을 이용하여 노광된 부분을 식각한다. 이러한 방식으로 모든 층을 제작하고 각 층을 열접합 공정을 통해 접합한다. Type-A 연소기 제작에서는 최종 접합 단계에서 Figure 2와 같이 촉매가 코팅된 세라믹 폼을 삽입하였다. Type-B의 경우 연소 챔버 표면에 지지체 층을 형성해야 하기 때문에 모든 층의 접합을 완료한 후에 촉매 지지체 및 촉매 코팅 공정을 수행하였다.

**Table 1** Dimension of combustors

	Size (mm) [L×W×H]	Volume (cm <sup>3</sup> )
Combustor	30×20×3	1.8
Combustion chamber	12×12×1	0.144

**Fig. 3** Fabricated packed bed type combustor (Type A)

연소기는 3 층 구조로 상위 층에는 반응물과 생성물의 입구와 출구를 제작한다. 연소기의 크기는 Table 1 에 제시하였다. 연소기 입구와 출구에는 1/16"의 SUS-304 튜브를 연결하였으며 고온에서도 견딜 수 있는 graphite 접착제를 이용하여 접합하였다.

### 2.2.1 Type A 연소기 제작

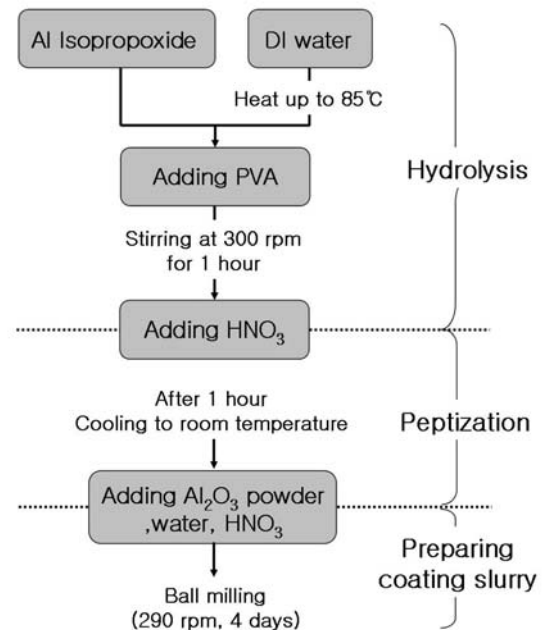
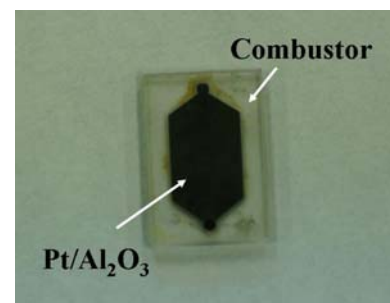
Type A 연소기의 지지체로 사용한 세라믹 폼에 제작에 앞서 백금 촉매를 코팅하였다. 이 연구에서 사용한 세라믹 폼은 내화벽돌로 사용되는 Isolite™ B5 로 71%의 기공률을 가지며 지지체 세공의 평균 직경은 약 50  $\mu\text{m}$ 이다. 지지체는  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ 로 구성되어 있다. 지지체에 대한 촉매 코팅은 염화백금산을 이용한 함침법을 이용하여 수행하였다.

Figure 3 은 최종 접합 직전에 촬영한 연소기이다. 연소기 내부에 그림과 같이 백금 촉매가 코팅된 세라믹 폼이 삽입되었다. 촉매 지지체에서 백금 촉매의 질량 비율은 12 %로 총 41 mg 의 백금이 코팅되었다.

### 2.2.2 Type B 연소기 제작

Type B 연소기는 연소 챔버 표면에  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 코팅하여 지지체를 형성하고 백금 촉매를 코팅하는 방식으로 제작된다.

지지체 형성을 위하여 졸-겔법을 이용하여 코팅 용액을 제조하였다. 코팅 용액 제조 공정은 Figure 4 와 같다. 먼저 85 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 100 물의 탈이온화된 물(DI water)에 1 물의 알루미늄 이소프

**Fig. 4** Preparation process of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating slurry**Fig. 5** Fabricated thin film type combustor (Type B)

로폭사이드(AIP,  $\text{Al}(\text{OC}_3\text{H}_7)_3$ , Sigma Aldrich 98%+)를 첨가하고 300rpm으로 교반하며 가수분해 반응을 유지한다. 여기에 PVA(Poly Vinyl Alcohol)를 첨가하여 용액의 점성을 증가시킨다. 다음으로 0.07 몰의 질산을 첨가하여 형성된 수산화물 입자를 해교시킨다. 이렇게 형성된 졸을 서냉한 후  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말 (Alfa Aesar, 평균 입자 직경 : 3  $\mu\text{m}$ , BET 표면적 : 80-100 $\text{m}^2/\text{g}$ )를 첨가하여 용액 내 입자의 농도를 15%로 증가시킨다. 이때 질산을 첨가하여 용액의 pH를 3.8~4 가 되도록 조절하여 입자의 침전을 방지한다. 마지막으로 290rpm으로 4 일간 볼-밀을 수행하여 입자의 크기를 1  $\mu\text{m}$  이하로 감소시킨다.

앞의 공정을 통해 제작된 용액을 이용하여 연소기 내부에 촉매 지지체를 코팅한다. 먼저 연소기 내부에 코팅 용액을 주입한 후 압축 질소를 이용하여 연소 챔버 내의 잉여 용액을 제거한다. 다음으로 대류 오븐을 이용하여 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 30 분간 건조시킨다. 다음으로 코팅된  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 질량은 측정된 후 앞의 과정을 반복한다.

**Table 2** Specification of catalyst and support of Type B

Pt	7 mg
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27 mg
Calculated surface area	2.16m <sup>2</sup> – 2.7m <sup>2</sup>
Enhancement Factor	9483

이 연구에서는 최종적으로 27 mg의 알루미늄이 코팅될 때까지 이상의 과정을 반복하였다. 마지막으로 건조를 마친 연소기는 500°C에서 12 시간 동안 하소하여 박막에 남아있는 유기물을 제거하였다.

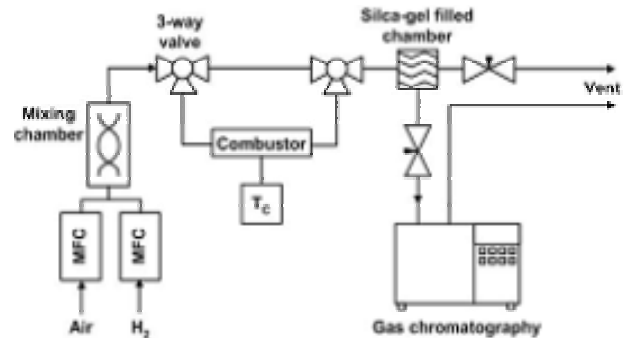
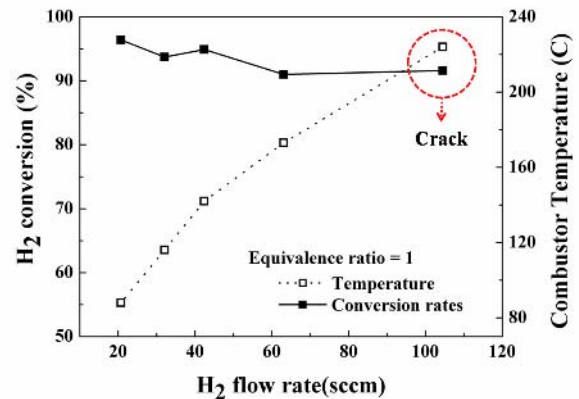
Figure 5는 지지체 형성 후 함침법으로 백금 코팅을 완료한 연소기의 사진이다. 연소 챔버 내부에 지지체와 백금 촉매가 코팅된 것을 확인할 수 있다. Table 2는 제작된 연소기에 사용된 지지체와 촉매의 특성을 나타내고 있다. 지지체에 의 표면적은 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 파우더의 비표면적과 질량을 이용하여 계산하였다. 이는 코팅 용액에서 거의 대부분을 첨가한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 파우더가 차지하며 비가역적인 상태에서 형성된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 파우더가 열처리 과정에서 변하지 않기 때문에 타당하다. 면적의 enhancement factor는 연소 챔버에 지지체를 코팅함으로써 늘어난 표면적의 비율을 나타낸 것으로 이 연구에서 제작한 연소기의 경우 약 9,000 배 이상의 표면적을 얻을 수 있었다.

### 2.3 실험 장치 구성

제작된 연소기 시험을 위한 시험 장치 구성은 Figure 6과 같다. 수소와 공기는 MFC를 이용하여 유량을 조절하였으며 각 기체를 혼합 챔버에 공급하였다. 혼합 챔버를 빠져나온 혼합 기체를 연소기에 공급하기에 앞서 GC (ACME 6000, 영린기기)를 이용하여 조성을 분석하였다. 분석 컬럼으로는 산소와 질소를 분리할 수 있는 Molesieve 13X (RESTEK Co.)을 사용하였다.

촉매 연소 반응의 생성물 분석 역시 GC를 이용하여 수행하였으며 생성된 기체의 수분을 제거하기 위해 반응 후 기체가 실리카겔(silica gel)을 통과하도록 하였다.

연소기의 온도는 표면 중심 온도를 측정하여 기록하였다. 초소형 연소기를 사용할 경우 메탄올 개질 반응과 같은 흡열 반응에 직접적으로 열을 공급하거나, 열전소자를 표면에 부착하여 전력을 생산하는 방식으로 사용할 수 있다. 따라서 기존의 연소기와 달리 표면 온도를 측정하는 방식으로 성능 평가를 수행하였다.

**Fig. 6** Experimental setup for performance test of micro-combustor**Fig. 7** Conversion rates and temperature with different H<sub>2</sub> flow rates (Type A)

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 세라믹 폼을 이용한 연소기 - Type A

Figure 7은 수소 유량 변화에 따른 온도 및 전환율 변화를 나타내고 있다. 공기 유량은 이론당량비 (stoichiometric mixture)가 되도록 조절하였다. 연소기는 단열되어 있지 않기 때문에 외부로의 열손실과 내부에서 발생하는 열량이 에너지 평형을 이루는 시점에서 정상상태가 되고 일정 온도를 유지하게 된다.

실험결과 20 sccm의 유량에 대하여 88°C의 표면 온도가 측정되었으며 온도는 수소 유량이 증가함에 따라 지속적으로 증가함을 확인하였다. 100 sccm의 수소 유량에 대해서는 224°C의 온도가 측정되었다. 100 sccm 이상의 유량을 공급한 경우 세라믹 폼의 입구 부분에서 과도한 반응으로 인하여 열점(hot spot) 형성되어 튜브를 고정하기 위해 사용한 graphite에 균열이 생기거나 연소기가 파손되는 현상이 나타났다. 제작된 연소기가 안정하게 구동 가능한 최대 유량인 100 sccm에서 연소기에 의해 발생된 열은 약 16 W로 제작된 연소기의 에너지 밀도는 약 8.9 W/cm<sup>3</sup>이다.



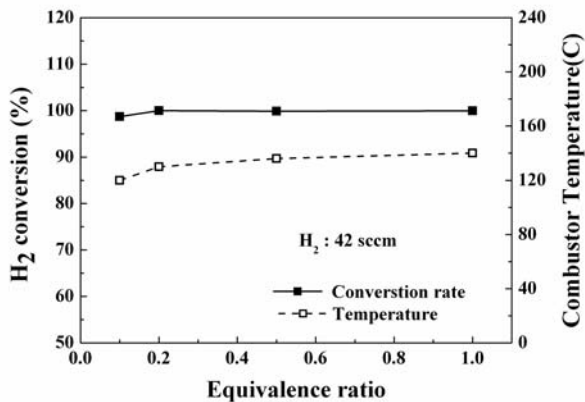


Fig. 8 Conversion rates and temperature with different equivalence ratios (Type B)

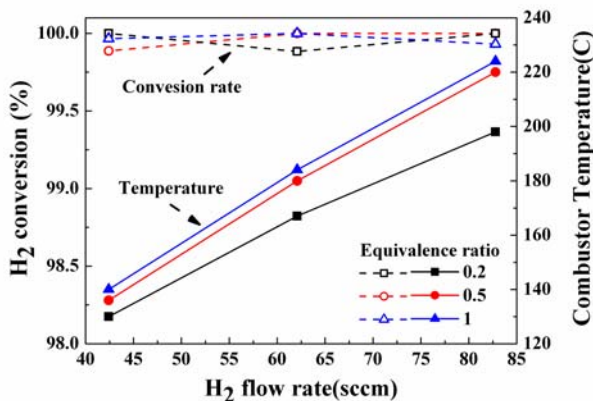


Fig. 9 Conversion rates and temperature with different H<sub>2</sub> flow rates (Type B)

### 3.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 이용한 연소기 - Type B

Figure 8 은 수소 유량이 42 sccm으로 고정된 상태에서 이론당량비를 기준으로 공기 유량을 증가시켜 측정된 당량비 변화에 따른 온도 및 전환율 변화를 나타내고 있다. 실험 결과 모든 유량 조건에 대하여 99% 이상의 높은 수소 전환율을 얻었으며 연소 챔버에 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 코팅한 연소기가 연소 반응을 안정적으로 유지함을 확인하였다. 예혼합 기체 중의 수소 농도는 4%로 수소/공기 혼합기체의 가연 범위 (4~75%)의 하한치에 해당한다. 이 연구에서 제작한 초소형 연소기를 이용하였을 때 수소 전환율은 97% 정도로 높은 전환율을 보였으며 낮은 당량비에서도 연소 반응이 잘 일어남을 확인하였다.

전환율은 당량비 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 온도는 당량비가 감소함에 따라 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 연소기에 공급된 수소의 유량을 일정하지만 공급된 공기 중 반응에 참여하지 않은 산소, 질소의 양이 증가하여 반응에 의해 생성된 열을 흡수하였기 때문이다. 그러나 이러한 잉여 기체의 영향은 크게 나타나지는 않았다.

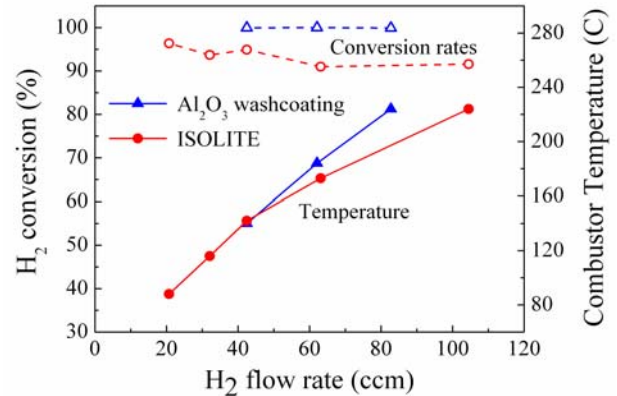


Fig. 10 Comparison of conversion rates and temperature of two micro combustors

Figure 9 는 유량과 당량비 변화에 따른 온도 및 전환율 변화를 나타내고 있다. 모든 유량 및 조성에 대하여 99%이상의 수소 전환율이 측정되었으며 연소기 정상적으로 동작함을 확인하였다. 또한 Type A 와는 달리 열점 현상에 의한 파손 현상이 나타나지 않았다. 반응이 안정적임을 확인하였다.

### 3.3 Packed bed type 과 Thin film type 의 비교

#### 3.3.1 가공 공정

가공 공정은 Type A 에 비해 Type B 의 연소기가 간단하고 제작 실패가 적게 나타났다. 이는 팩베드 형태(Type A)의 경우 연소기 제작 공정과 촉매 담지 공정이 독립되어 있기 때문이다. 즉, 연소기를 제작한 후 성공적으로 담지된 촉매를 삽입한 후 마지막 접합 공정을 수행하면 제작이 완료되며, 연소기 제작 공정과 촉매 공정을 따로 고려하고 독립적으로 수행할 수 있다. 따라서 각각의 공정 중 한 공정의 성공 여부가 다른 공정에 영향을 주지 않는다. 이에 반해 표면 코팅 형태(Type B)는 연소기를 제작한 후에 순차적으로 촉매 공정을 수행하게 되어 지지체 코팅을 포함한 촉매 공정이 실패할 경우 연소기 제작 공정부터 다시 시작해야 된다는 단점이 있다. 따라서 제작 공정의 용이성에 있어서는 팩베드 형태의 연소기가 선호된다.

그러나 대부분의 마이크로 반응기, 특히 MEMS 가공 공정을 기반으로 한 연소기들은 주로 표면 코팅 타입을 사용하고 있다. 이는 팩베드 타입의 연소기를 제작하는데 있어서 이에 적합한 지지체를 사용하지 못하기 때문이다. 실제로 이 연구에서 사용한 세라믹 폼의 경우 연소 챔버에 삽입하기 위해 작은 크기로 가공하는 과정에서 세라믹 폼의 낮은 기계적 강도로 인해 쉽게 파손되었다.

#### 3.3.2 연소 성능

Figure 10 은 두 연소기의 성능을 비교하고 있다

(당량비 1). 표면 코팅 형태(Type B) 연소기는 7 mg의 백금 촉매가 코팅되었으며 팩베드 형태(42 mg)와 비교할 경우 16.7%의 백금이 사용되었다. 그러나 실험에서는 팩베드 형태의 연소기 보다 높은 전환율을 보였다. 이는 지지체의 표면적의 차이로 인한 것으로 판단된다. 사용한 세라믹 폼의 BET 표면적은 측정 결과  $0.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 확인되었으며 지지체의 질량을 고려할 경우 약  $0.175 \text{ m}^2$ 의 표면적을 가진다. 이에 반해 표면 코팅 형태의 연소기에서 지지체는 약  $2 \text{ m}^2$ 의 표면적을 가진다(Table 2). 따라서 세라믹 폼을 사용하였을 때 더 많은 백금 촉매를 코팅하였음에도 불구하고 백금이 효과적으로 분포되지 못하여 오히려 반응에 사용된 촉매 활성점은 더 적고 이로 인해 전환율이 더 낮게 측정된 것으로 판단된다. 따라서 연소 성능 관점에서 이 연구에서 사용한 세라믹 폼인 Isolite는 기존의 알루미늄 지지체에 비하여 다소 떨어지는 성능을 보였다. 따라서 연소 성능 관점에서 세라믹 폼에 Type B에서 제작한 위시코트 용액을 이용하여 세라믹폼 세공 표면에 2 차 세공을 형성할 필요가 있다. 그러나 이 경우에도 세라믹 폼의 낮은 기계적 강도는 가공 공정 비교에서 언급한 바와 같이 제작 상의 문제로 남게 된다.

#### 4. 결 론

감광유리의 MEMS 공정을 이용하여  $1.8 \text{ cm}^3$  크기의 초소형 촉매 연소기 제작 공정을 확립하고 제작을 수행하였다. 촉매 삽입 방식으로 세라믹 폼을 지지체로 한 팩베드 형태와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 연소 챔버 표면에 코팅하는 표면 코팅 형태를 사용하여 두 가지 다른 형태의 연소기를 제작하였다.

수소 촉매 연소 시험 결과 두 연소기에서 모두 연소 반응이 안정적으로 유지되었다. 이 연구에서 제작한 연소기는 연소 촉매로 가장 널리 사용되는 백금을 사용하였으므로 다른 탄화수소계 연료를 이용한 연소 반응에 사용할 수 있다. 또한 과산화수소 분해 반응과 같은 발열 반응의 반응기로도 사용할 수 있어 초소형 동력원의 열원으로 적용이 가능할 것으로 기대한다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행

된 연구임(R0A\_2007\_000\_20065\_0).

#### 참고문헌

- (1) Fernandez-Pello, A. Carlos, 2002, "Micro-Power Generation Using Combustion: Issues and Approaches," *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 883~899.
- (2) Kyu Tae Kim, Dae Hoon Lee and Sejin Kwon, 2006, "Thermal and Chemical Quenching Phenomena in a Microscale Combustor (II) - Effects of Physical and Chemical Properties of  $\text{SiO}_x(x \leq 2)$  Plates on Flame Quenching," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 30, No. 5, pp. 405~412.
- (3) Jeongmin Ahn, Craig Eastwood, Lars Sitzki and Paul D. Ronney, 2005, "Gas-phase and Catalytic Combustion in Heat-Recirculating Burners," *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2463~2472.
- (4) Nam Il Kim, Satoshi Aizumi, Takeshi Yokomori, Soichiro Kato, Toshiro Fuji and Kaour Maruta, 2007, "Development and Scale Effects of Small Swiss-Roll Combustors," *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 3243~3250.
- (5) Vican, J., Gajdeczko, B.F., Dryer, F.L., Milius, D.L., Aksay, I.A. and Yetter, R.A., 2002, "Development of a Microreactor as a Thermal Source for Micro-electromechanical Systems Power Generation," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, pp. 909~916.
- (6) Yuji Suzuki, Yuya Hori and Nobuhide Kasagi, 2003, "Micro Catalytic Combustor with Tailored Pt/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  Films," *Power MEMS 2003*, Makuhari, Japan.
- (7) Michael T. Janicke, Harry Kestenbaum, Ulrike Hagendorf, Ferdu Schuth, Maximilian Fichtner and Klaus Schubert, 2000, "The Controlled Oxidation of Hydrogen from an Explosive Mixture of Gases Using a Microstructured Reactor/Heat Exchanger and Pt/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  Catalyst," *Journal of Catalysis*, Vol. 191, pp. 282~293.
- (8) Shin-Kun. Ryi, Jong-Soo Park, Seung-Hoon Choi, Sung-Ho Cho and Sung-Hyun Kim, 2005, "Novel Micro Fuel Processor for PEMFCs with Heat Generation by Catalytic Combustion," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 113, pp. 47~53.
- (9) Dae-Eun Park, Tae-Kyu Kim, Sejin Kwon, Choong-Ki Kim and Euisik Yoon, 2005, "Micromachined Methanol Steam Reforming System as a Hydrogen Supplier for Portable Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Sensor and Actuators A*, Vol. 135, pp. 58~66.
- (10) Taegy Kim and Sejin Kwon, 2006, "Fabrication and Performance Evaluation of MEMS Methanol Reformer for Micro Fuel Cells," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 30, No. 12, pp. 1196~1202.
- (11) Wonyoung Choi, 2005, "Combustion Characteristics of Premixed Hydrogen-Air in Micro Scale Catalytic Combustors," *MS Thesis*, KAIST.