

# 적외선 열화상 온도 측정법을 이용하여 살펴본 서브밀리미터 스케일 촉매 연소기에서의 수소-공기 예혼합 가스의 촉매 연소 특성

최원영\*\* · 권세진\*\*

## An Investigation on Combustion Characteristics of Hydrogen-Air Premixture in a Sub-millimeter Scale Catalytic Combustor using Infrared Thermography

Wonyoung Choi\*\* and Sejin Kwon\*\*

### ABSTRACT

A sub-millimeter scale catalytic combustor with a simple plate-shaped combustion chamber was fabricated. A porous ceramics support coated with platinum catalyst was placed in the chamber. The combustor has a gallium arsenide window on the top that is transparent to infrared ray. The temperature distribution in the combustion chamber was measured using infrared thermal imager while hydrogen-air premixture is steadily supplied to the combustor. The area where the catalytic reaction took place broaden for higher flow rate and lower equivalence ratio made activated area in the combustion chamber broaden. The amount of coated platinum catalyst did not affect the reaction. Stop of reaction, which is similar to flame quenching of conventional combustion, was investigated. Large content of heat generation and broad activated area are essential criteria to prevent stop of reaction that has a bad effect on the combustor performance.

**Key Words** : Catalytic combustion, Micro combustion, Platinum catalyst

### 기 호 설 명

MFC Mass Flow Controller  
GC Gas Chromatography

XRD X-Ray Diffraction

## 1. 서 론

여러 가지 구성 요소가 모인 하나의 시스템이 마이크로 스케일의 크기를 가지기 위해서는 그 시스템을 구동하기 위한 동력원도 그에 상응하는 작은 크기를 가져야 한다. 그러나 현재 널리 사용되고 있는 배터리는 에너지 밀도가 낮아 고출력을 내거나 고온이 필요한 마이크로 장치를 개발할 경우 동력원의 크기가 커져 마이크로 스케

일을 벗어나게 되는 문제가 생긴다. 이를 해결하기 위하여 마이크로 연소 장치를 구현하는 연구가 진행되어 왔다. 연소를 이용한 동력 장치는 일반적인 배터리에 비하여 적게는 수 배, 많게는 수십 배의 에너지 밀도를 가지고 있기 때문이다[1]. 마이크로 연소의 이러한 특성을 이용하면 고출력 마이크로 열원을 만들 수 있으며 이것은 마이크로 반응기나 마이크로 개질기 등 작동을 위하여 적정 고온이 필요한 장치의 열원으로 활용될 수 있다[2].

그러나 일반적인 화염 연소를 이용한 마이크로 연소 장치는 좁은 연소실 공간으로 인한 소염 및 화염 불안정, 높은 반응 온도로 인한 열손실 증

\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 기계공학전공

† 연락처자. blsword@kaist.ac.kr

가 등의 문제점이 있다. 따라서 대안으로 촉매 연소를 도입하였다. 촉매 연소는 촉매를 이용하여 연소 반응을 일으키고 지속시키는 연소 방법으로 화염대 없이 연료-산화제가 촉매와 접촉하는 표면 반응에 의하여 연소 반응이 지속된다. 화염이 존재하지 않아 소염 문제가 없고 반응 온도가 상대적으로 낮으므로 열손실이 적어지는 특성이 있어 열손실이 증가하는 마이크로 스케일 연소 장치에 유리하다[3].

이에 KAIST에서는 밀리미터 스케일 촉매 연소기에서 백금 촉매를 이용한 수소-공기 예혼합 가스의 연소 특성 및 마이크로 스케일로의 적용 가능성을 알아보는 연구가 수행되었다. 상온에서부터 촉매 반응이 활발하게 안정적으로 지속되는 것을 확인하였으며 연소실의 일부에서 대부분의 예혼합 가스가 반응하여 연소실의 크기를 더욱 줄여 마이크로 스케일 촉매 연소 장치를 개발할 수 있음을 발견하였다[2,3].

이 연구에서는 마이크로 스케일에서의 수소-공기 예혼합 가스의 촉매 연소 특성을 알아보기 위하여 간단한 구조의 연소실을 가진 서브밀리미터 스케일 촉매 연소기를 제작하였다. 표면적이 넓은 다공성 세라믹에 백금 촉매를 담지하고 연소기에 장치한 후 수소-공기 예혼합 가스를 공급하였으며 적외선 열화상 장치를 이용하여 연소기 내부의 온도 분포를 촬영하였다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 전체 실험 장치

Figure 1은 전체 실험 장치를 간략히 나타낸 그림이다. 수소와 공기를 MFC로 공급하고 중간 탱크에서 혼합한 후 이를 촉매 연소기에 공급하였다. 연소기 바깥에 장치한 적외선 열화상 장치를 이용하여 연소실 내부 온도 분포를 측정하고 PC를 이용하여 기록하였다. 전환율 측정을 위해 연소기 배출구 끝에는 GC를 연결하였다. 촉매 반응으로 생성되어 연소기에서 빠져나오는 수분을 제거하기 위하여 반응 후 가스가 실리카겔을 통과하도록 하였다.

Figure 2는 이 연구에 사용된 서브밀리미터 스케일 연소기를 나타낸 사진이다. 본체, 투과창, 덮개의 세 부분으로 이루어져 있다. 본체에 촉매를 코팅한 다공성 물질을 수납하고 투과창과 덮개로 덮는 구조이다. 투과창을 통하여 연소 반응을 확인할 수 있도록 하였다.

본체에는 예혼합 가스의 공급구와 배출구, 연소실이 있다. 재료는 세라믹을 사용하여 열손실을 줄이고 본체의 열팽창으로 인해 고온에서 투과창이 깨지는 것을 방지하였다. 투과창은 본체

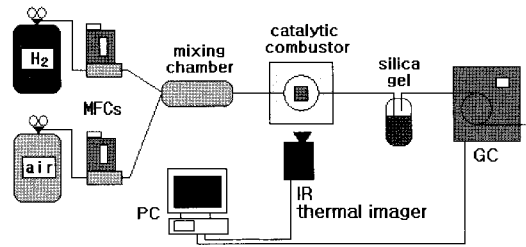


Fig. 1 전체 실험 장치의 개략도

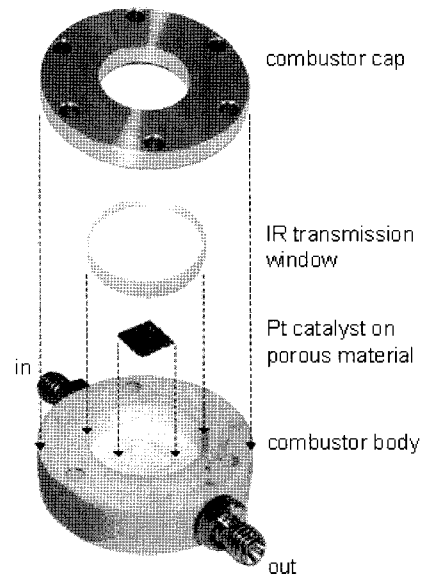


Fig. 2 촉매 연소기의 조립도

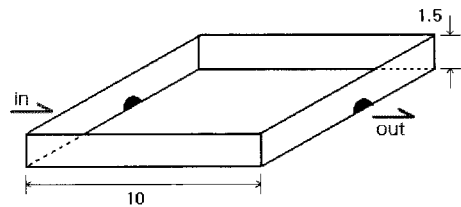


Fig. 3 연소실의 구조(단위: mm)

의 연소실 부분을 덮는 역할을 하며 두께 5 mm, 지름 2.54 mm인 원판 모양이지만 하면 목적에 따라 다양한 재료를 사용할 수 있다. 덮개는 본체와 투과창을 단단히 결합하여 연소기 기밀을 유지하는 역할을 한다.

연소실은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 크기는 10×10×1.5 mm로 얇은 평판 모양을 하고 있으며 양 측면으로 가스 공급구와 배출구가 있는 간단

한 구조이다. 내부에 촉매를 코팅한 다공성 물질을 수납할 수 있도록 하였다.

## 2.2 촉매 합성

촉매는 백금(Pt)을 사용하였으며 지지체는 다공성 세라믹인 Isolite B5를 이용하였다. 평균 세공 지름은 50  $\mu\text{m}$ , 공극률은 71 %이다. 촉매를 코팅한 후 연소실에 수납될 수 있도록 연소실과 같은 10×10×1.5 mm 크기로 가공하였다. 백금 전구체로는 염화백금산( $\text{H}_2\text{PtCl}_6$ )을 이용하였으며 용매는 아세톤을 사용하였다.

촉매 합성법은 단순 침적법(incipient wetness method)을 이용하였다. 지지체의 세공 부피를 측정하고 그만큼의 전구체 용액을 만들어 지지체에 흡수시킨 후 건조-환원하는 방법이다. 실험실 스케일에서 재현성이 좋은 촉매-지지체를 제조할 수 있다는 특성이 있다[4]. 먼저 잘 건조된 지지체에 충분히 물을 흡수시킨 후 흡수된 물의 양을 측정하여 세공의 부피를 측정한다. 그리고 그만큼의 아세톤을 준비하고 염화백금산을 용해시킨다. 이 용액을 잘 건조된 지지체에 흡수시킨 후 70°C 온도의 오븐에서 6시간 동안 건조하였다. 이를 석영 반응기에 넣고 50 ml/min의 수소 흐름 하에서 온도 0~300°C에서 3시간, 300°C에서 6시간동안 환원시켰다[5].

Figure 4는 다공성 세라믹 지지체에 백금 촉매를 합성하는 과정을 나타낸 사진이다. 모든 과정이 끝난 후 백금흑(platinum black)입자가 고르게 입혀져 진한 회색을 띠고 있는 것을 볼 수 있다. 지지체에 정상적으로 백금이 환원되었는지 알아보기 위해 XRD 검사를 수행하였다. 모든 시편에서 백금이 지지체 표면에 코팅되었으며 백금 입자의 평균 지름은 백금 농도에 따라 5~13 nm으로 나타났다.

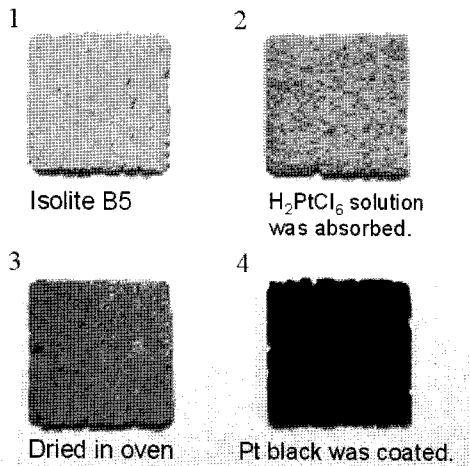


Fig. 4 백금 촉매의 합성 과정

## 2.3 연소실 내부 온도 측정

이 연구에서는 서브밀리미터 스케일 촉매 연소기의 내부 온도 측정을 위해 적외선 열화상 장치를 사용하였다. 연소실의 크기가 작아 열전대로는 연소실의 온도 분포를 알아보는 데 한계가 있기 때문이다. 이 연구에 사용된 장치는 NEC Sanei에서 제작된 TH9100으로 8~14  $\mu\text{m}$  파장의 적외선을 감지하여 온도를 측정할 수 있다.

그러나 적외선 온도 측정법으로는 물체 표면의 온도만을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 연소실의 한 면을 덮는 투과창으로 적외선 투과 물질인 갈륨비소(GaAs)를 사용하여 투과창 아래에 위치한 연소실의 내부 온도를 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 5는 갈륨비소의 겉모습과 파장에 따른 투과율을 나타낸 것이다. 가시광선은 투과하지 않으나 8~14  $\mu\text{m}$  대역의 적외선을 약 55% 투과하는 특성이 있다.

## 3. 실험 조건

본 연구에 사용된 서브밀리미터 스케일 연소기에서 연소 특성 및 연소기 성능에 영향을 줄 수 있는 제어 파라미터로는 당량비, 공급 유량, 백금 비율이 있다. 각각의 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 조건을 설정하였다.

연소기에 공급한 가스는 수소-공기 예혼합 가스로 당량비는 1.0을 기준으로 하여 0.2, 0.5, 1.5로 변화시켰다. 우선 공급 유량의 영향을 보기 위하여 당량비는 1, 백금 비율은 10  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 로 고정하고 Table 1과 같이 4단계로 유량을 변화시켰

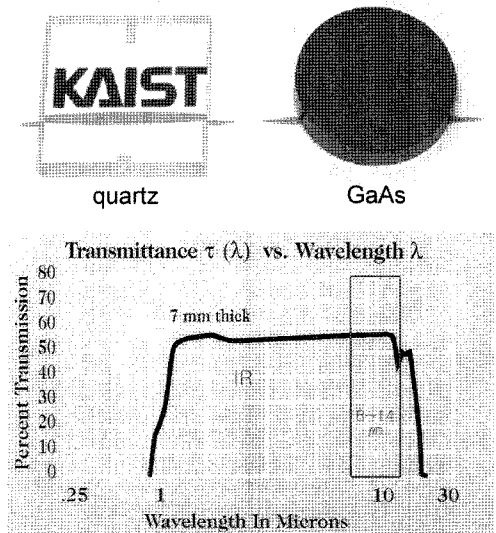


Fig. 5 갈륨비소의 외관 및 광 투과성

다. 각 조건 항목에 관하여 레이놀즈수를 계산해 보면 모두 층류 유동으로 마이크로 스케일에서의 유동 특성을 잘 나타내는 것을 알 수 있다[6].

Table 1 공급 유량의 변화

합계 (ml/min)	유량(ml/min)		당량비	평균유속 (cm/s)	Re
	수소	공기			
84	25	59	1.0	9.33	19.6
169	50	119		18.78	39.5
253	75	178		28.11	59.2
338	100	238		37.56	79.0

백금 비율은 촉매 합성 단계에서 세공 부피당 백금의 질량을 변화시키는 방법으로 조절하였다. Table 2와 같이 5단계로 변화시켰으며 당량비는 1.0, 공급 유량은 253 ml/min으로 고정하였다. 단 백금 비율이 1.0  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 인 경우 연소기 동작 초기에 507 ml/min을 공급한 후 다시 253 ml/min로 조정된 경우를 1.0\*  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 로 구분하였다.

그리고 발생 열량이 같을 때 희박 당량비의 영향을 보기 위하여 Table 3과 같이 당량비 및 유량을 조정하였다. 이 때 백금 비율은 10  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 로 고정하였다.

Table 2 백금 비율의 변화

세공부피당 백금 질량 ( $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ )	지지체 단위질량당 세공부피 ( $\mu\text{l}/\text{g}$ )	백금 비율 (wt%)	당량비	공급 유량 (ml/min)
1.0*	746.35	0.07	1.0	507→253
1.0				253
4.0				
10.0				
25.0				
50.0				

Table 3 당량비의 변화

당량비	유량(ml/min)		합계 (ml/min)	Re
	수소	공기		
0.2	50	600	650	147.2
1.0	50	119	169	39.5

이 연구에 사용된 서브밀리미터 스케일 연소기는 실험 목적에 따라 투과창을 바꿀 수 있다. 먼저 연소기의 투과창 부분에 가시광선을 투과하는

불화마그네슘( $\text{MgF}_2$ )을 삽입하여 연소 반응 도중 육안으로 나타나는 변화를 관찰하였다.

연소기의 내부 온도를 측정할 때는 투과창으로 갈륨비소(GaAs)를 삽입하였다. 그러나 갈륨비소는 이 대역의 적외선을 55 %만 투과하므로 정확한 온도값이 나타나도록 복사율을 보정하였다. 보정된 복사율에 맞추어 연소기의 내부 온도를 측정, 시간에 따른 연소실 내부 온도 분포를 얻었다. 6초에 1회씩 온도 분포를 기록하였으며 총 측정 시간은 80분으로 하였다. 반응 후 가스 분석은 온도 측정과 동시에 이루어졌다. 분석에 사용된 컬럼은 Molesieve 13X 80/100로 1회 분석에 5분이 소요되었으며 80분 동안 순차적으로 분석하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 연소기 내부 관찰 및 전환율 측정

Figure 6은 시간에 따른 연소기의 내부 반응을 육안으로 관찰한 사진이다. 당량비 1인 수소-공기 예혼합 가스를 253 ml/min 유량으로 공급하였으며 백금의 농도는 4  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 이다. 사진 왼쪽은 공급 가스의 입구, 오른쪽은 출구이다.

반응은 연소기에 예혼합 가스를 공급한 즉시 일어났으며 입구 부분에 생성물인 물이 방울져 맺혀있는 것을 볼 수 있다. 반응 시작 약 15초 후에는 입구 부분이 밝게 빛나기 시작하면서 물이 출구 쪽으로 이동하기 시작하였다. 약 1분이 지나면 입구 부분이 밝게 빛나며 반응이 활발히 일어났다. 그러나 연소기 내부의 물이 쉽게 배출되지 않아 물이 입구 쪽으로 흡수되기 시작하면서 반응 영역이 조금 작아지는 모습을 보였다. 이 상태에서 어느 정도 시간이 지나면 계속된 열량 공급으로 인하여 연소기 내부의 물이 완전히 기화되었고 약 20분 이후부터는 큰 변화가 나타나지 않았다.

간혹 물이 기화되기 전에 물이 촉매 표면을 완전히 잠식하여 촉매 반응이 멈추는 경우가 있었다. 이에 관한 것은 4.5에서 다루도록 하겠다.

Figure 7은 당량비 1, 공급 유량 338 ml/min인 경우 공급된 예혼합 가스의 전환율 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 반응 시작 20분 이후로는 전환율이 97 %까지 도달하여 서브밀리미터 스케일에서도 반응이 매우 활발하게 일어난다고 볼 수 있다. 반응 시작 후 수 분 안에 전환율이 급격히 증가하는 것으로 보아 이미 촉매 활성화(catalytic light-off)이 일어난 것을 뜻한다. 이것은 백금 촉매 하에서의 수소-공기의 촉매 반응 특성으로 알려진 것과 같다[7].

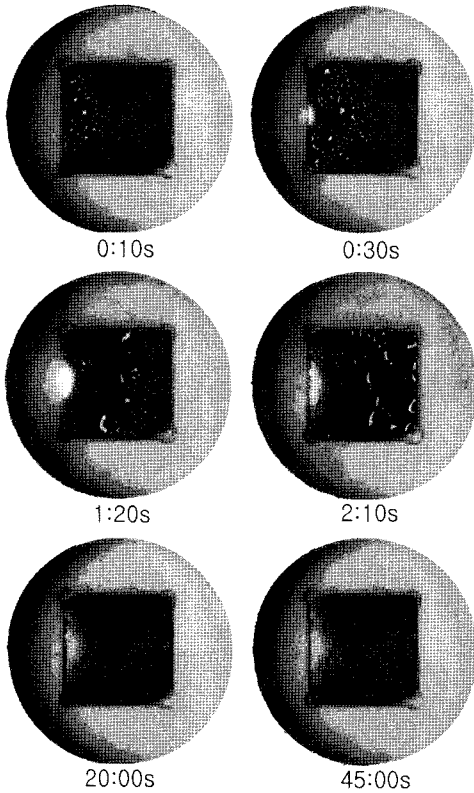


Fig. 6 시간에 따른 연소기 내부의 변화

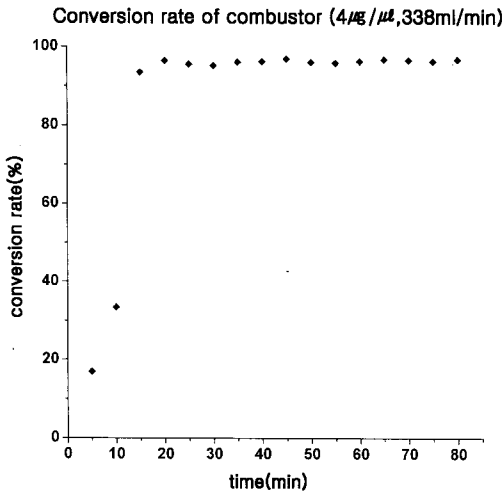


Fig. 7 시간에 따른 전환율의 변화

## 4.2 공급 유량의 영향

Figure 8은 당량비 1.0, 백금 농도  $10 \mu\text{g}/\mu\text{l}$ 로 고정시키고 공급 유량을 변화시켰을 때 시간에 따른 연소실 내부 온도의 변화를 나타낸 그림이다. 각 사각형의 왼쪽 부분이 가스 공급 입구이다. 공급 유량에 따라 반응 시작 10~20분까지는 연소기 내부에 물이 고여 있어 반응 영역이 입구 쪽 일부분에 국한되어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 Fig. 6의 결과와 같다. 시간이 지남에 따라 연소기에 열이 발생되면서 물이 기화되기 시작하며 반응 영역도 넓어진다. 반응 시작 후 약 30분이 지나면 반응 안정화 단계에 접어들어 온도 분포가 더 이상 변하지 않는다.

Table 4는 시간 60분에서의 연소기 내부의 최대 온도 및 평균 온도를 나타낸 것이다. 공급 유량이 증가할수록 발생하는 열량도 증가하여 평균 온도가 증가하는 모습을 보이고 있다. Fig. 9은 시간 60분에서  $300^\circ\text{C}$  이상의 고온 영역을 나타낸 그림이다. 공급 유량이 증가할수록 고온 영역의 면적도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 고온 영역은 입구 쪽에 편중되어 있다.

Table 4 시간 60분에서 연소실 내부 온도

공급 유량 (ml/min)	최대 온도 ( $^\circ\text{C}$ )	평균 온도 ( $^\circ\text{C}$ )
84	353.3	40.8
169	778.3	209.0
253	745.0	262.4
338	804.0	321.4

모든 공급 유량에서 연소기 내에서 온도가 가장 높아 반응이 활발한 부분은 입구 근처 일부에 불과하였다. 그러므로 연소기 내부의 최대 온도는  $700^\circ\text{C}$  이상이었지만 평균 온도는 이에 비해 훨씬 낮았다. 또한 공급 유량  $84 \text{ ml}/\text{min}$ 을 제외하고 반응 안정화 단계에서 전환율이 97% 이상으로 공급된 예혼합 가스가 거의 모두 반응하였다. 따라서 서브밀리미터 스케일의 매우 좁은 공간에서도 공급 가스의 거의 대부분이 반응하였다고 볼 수 있다.

공급 유량  $84 \text{ ml}/\text{min}$ 의 경우에는 시간 5분과 20분에 반응이 일어나지 않은 것을 볼 수 있는데 이는 연소기에 고인 물이 지지체에 흡수되어 촉매 표면이 모두 잠식되었기 때문으로 보인다. 시간이 지난 후 반응이 다시 시작되었으나 촉매의 대부분에 물이 차 있어 공급한 가스가 모두 반응하지 못하였다.

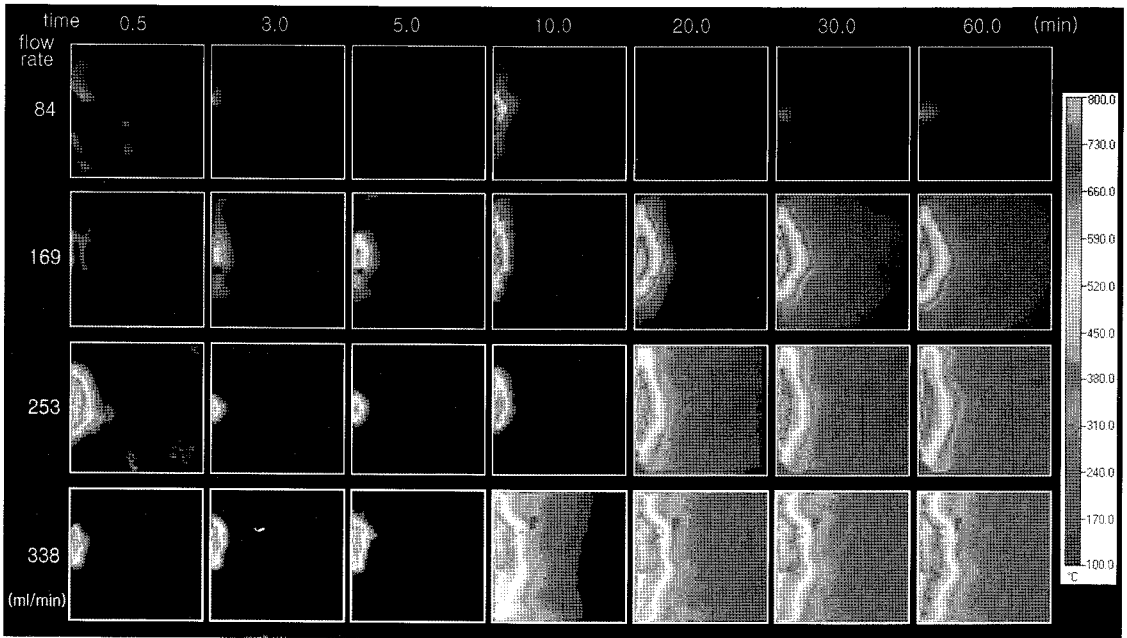


Fig. 8 공급 유량 및 시간에 따른 연소실 내부 온도 변화

### 4.3 백금 비율의 영향

Figure 10은 공급 유량 253 ml/min, 당량비 1.0으로 고정하고 백금 비율을 1~50  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 로 변화시켰을 때 시간에 따른 연소실 내부 온도의 변화를 나타낸 것이다. 모든 백금에 대하여 반응 시작 30초, 5분까지는 연소기 내부에 물이 고여 반응 영역이 입구 근처 일부분에 국한된 모습을 보이고 있다. 반응 시작 20분 후에는 물이 기화되며 연소실의 대부분 영역이 100°C 이상으로 높아졌고 이후 반응 안정화 단계에 접어들어 온도

분포 상에는 특별한 변화가 나타나지 않았다.

백금 비율과 관계없이 대부분의 반응은 입구 근처에서만 활발하게 일어났다. 또한 Fig. 11에 나타난 것과 같이 시간 60분에서 300°C 이상의 고온 영역 면적도 거의 비슷하였다. 그리고 전환율도 반응 안정화 단계에서 95 % 이상으로 공급한 예혼합 가스가 거의 모두 반응하였다. 따라서 백금 비율이 반응 특성 및 연소기 성능에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 생각된다.

그러나 이는 백금의 농도를 낮추어도 촉매 반응성이 변하지 않음을 뜻한다. 특히 Fig. 10의 왼쪽에서 두 번째 결과로 백금 비율 1.0\*  $\mu\text{g}/\mu\text{l}$ 일 때의 결과를 살펴보면, 백금이 매우 희박하게 담

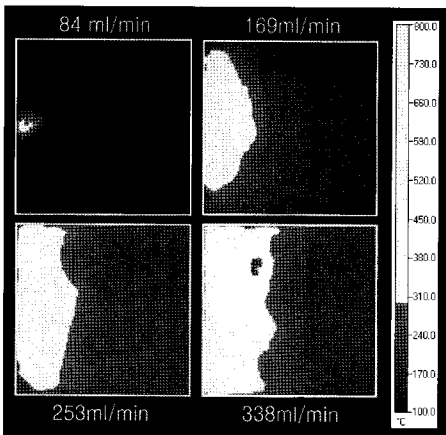


Fig. 9 시간 60분에서 공급 유량에 따른 300°C 이상 영역의 면적 비교

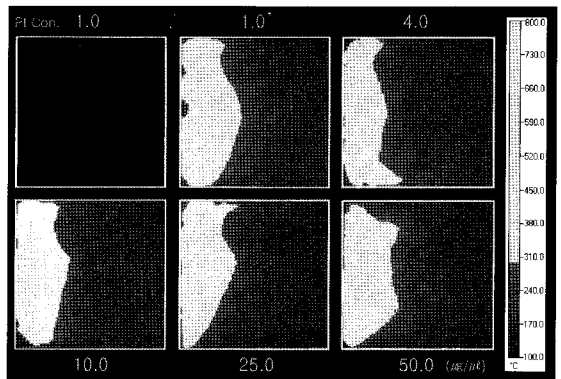


Fig. 10 시간 60분에서 백금 비율에 따른 300°C 이상 영역의 면적 비교

지되었음에도 연소기 작동 초반에 많은 유량을 공급하여 물을 기화시킨 후 유량을 조정하면 백금 비율이 더 높은 경우와 동일한 반응 특성을 보이고 있다.

#### 4.4 당량비의 영향

Figure 12는 생성되는 열량이 같은 조건에서 당량비를 0.2와 1.0으로 변화시킨 경우 시간에 따른 연소실 내부 온도 분포의 변화를 비교한 것이다. 같은 시간에서 당량비가 0.2일 때 반응이 활발한 고온 영역이 연소실의 모든 방향으로 더 넓게 분포하고 있다. 특히 반응 시작 후 20분까지는 반응 영역의 면적 차이가 매우 두드러진 것을 볼 수 있다. 그러나 당량비에 상관없이 반응이 활발한 최대 온도 부분은 입구 쪽에 편중되어 있는 모습을 보이고 있다.

그러나 시간 60분에서 온도 200℃ 이상 영역의 면적을 비교하였을 때 당량비 0.2일 경우가 더 넓은 것으로 보아 당량비 1.0인 경우보다 온도 분포가 좀더 고른 것을 알 수 있다. 이 현상의 원인은 4.3의 결과와 같이 공급 유량이 증가할 때 고온 영역의 면적이 증가하는 것과 화염 연소에서 당량비가 낮을 때 연소 속도가 감소하듯이 촉매 반응 속도가 감소하기 때문으로 생각된다.

#### 4.5 반응 멈춤 현상

촉매 반응이 일어나면서 연소기 내부에서는 물이 생성된다. 반응 초기 등 연소기의 온도가 낮을 경우 물은 액체로 존재하게 된다. 이렇게 생성된 물이 연소기를 잘 빠져나가지 못하면 다

공성 물질인 지지체에 스며들어 지지체의 세공을 메워나가면서 세공에 코팅된 촉매 표면이 물에 덮이게 된다. 만약 물이 스며드는 부분과 물이 스며들지 않아 반응이 일어나는 부분의 경계에서 발생 열량이 적을 경우 반응으로 생성된 물은 지지체 쪽으로 계속 스며들어 반응 영역을 잠식하게 된다.

지지체에 완전히 물이 스며들면 세공에 담겨진 백금 표면이 모두 물에 덮여 더 이상 촉매 반응이 일어나지 않고 멈추어서 화염 연소의 소멸과 유사한 현상이 발생한다. 실제 연소기를 운용함에 있어서는 원하는 온도까지 빠른 시간 안에 연소실 온도를 상승시켜야 한다. 반응 멈춤 현상이 과정을 방해하는 요소이므로 현상에 관한 이해와 방지책이 필요하다.

Figure 13은 연소기 내부에서 반응 멈춤 현상이 일어날 때 시간에 따른 연소실 온도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 입구 부분에서 반응이 일어나다가 시간이 지날수록 물이 스며들면서 반응 영역의 면적이 감소하며 연소실 내부의 최대 온도도 감소하는 것을 볼 수 있다.

반응 멈춤 현상이 일어난 후에도 예혼합 가스를 계속 공급하면 시간이 지난 후 반응이 다시 시작되기도 한다. 일단 반응 멈춤 현상이 일어난 후에는 물은 더 이상 생성되지 않는다. 시간이 지나면서 물이 어느 정도 빠져나가면 물로 덮여 있던 촉매 표면에서 매우 좁은 일부분이 노출될 수 있다. 이 부분에서 예혼합 가스가 활발히 반응하여 열이 발생되면서 더 많은 부분이 노출되고, 매우 짧은 시간에 반응 영역이 다시 형성되어 반응 멈춤 현상에서 회복된다. 이후 연소기의 온도 및 발생 열량에 따라 반응 안정화 단계로 가는 경우도 있고, 반응 멈춤 현상이 다시 일어나는 경우도 있다.

반응 멈춤 현상을 방지하기 위해서는 발생 열량을 증가시켜 물을 빨리 기화시키거나 반응 영역을 넓혀 물이 지지체 내로 스며드는 것을 막

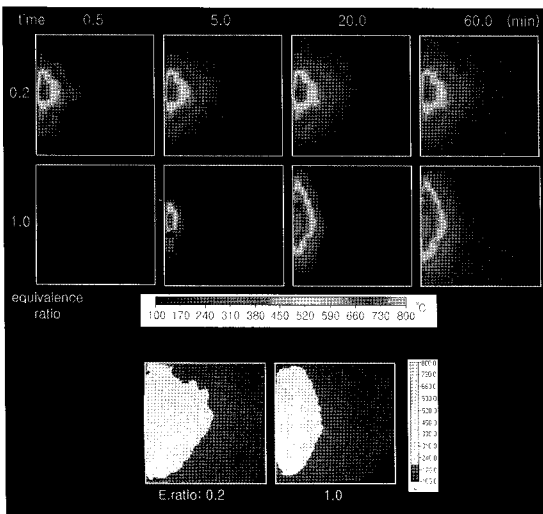


Fig. 11 당량비 및 시간에 따른 연소실 내부 온도 변화(상부그림) 및 온도 200℃ 이상 영역의 면적 비교(하부그림)

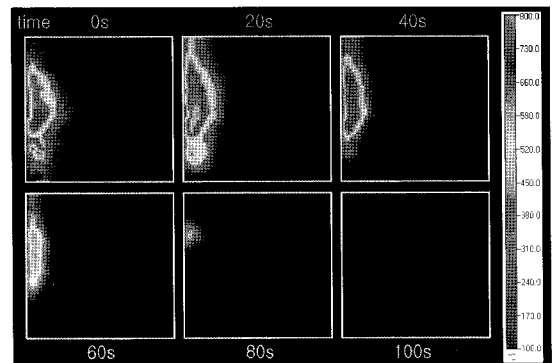


Fig. 12 반응 멈춤 현상이 발생하는 과정

으면 된다. 전자의 방법은 초기에 공급 유량을 증가시키는 것이다. Fig. 11의 결과 중  $1 \mu\text{g}/\mu\text{l}$ 의 경우에서 예혼합 가스를  $253 \text{ ml}/\text{min}$ 으로 공급하였을 때는 반응 멈춤 현상이 일어났으나 초기에  $507 \text{ ml}/\text{min}$ 를 공급하여 물을 기화시킨 후 다시  $253 \text{ ml}/\text{min}$ 으로 공급 유량을 줄인 경우에는 반응이 안정적으로 유지되었다. 후자는 당량비를 낮추는 것이다. Fig. 12의 결과와 같이 반응 초기에도 반응 영역이 넓어져 물이 지지체 쪽으로 스며드는 현상이 발생하지 않는다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 간단한 구조의 연소실을 가진 서브밀리미터 스케일 촉매 연소기를 제작하였다. 연소실 내부에는 촉매를 코팅한 다공성 세라믹을 수납하고 투과창을 통하여 연소실 내부를 관찰하거나 비접촉식으로 내부 온도를 측정할 수 있도록 하였다.

연소기 내부를 직접 관찰하고 적외선 열화상 장치로 연소실 내부 온도를 측정하여 연소기 입구 부분에서 반응이 매우 활발하게 일어나고 국부적으로  $700^\circ\text{C}$  이상의 고온 영역이 존재하는 것을 직접 확인하였다. 또한 전환율 측정을 통하여 반응 안정화 단계에서는 예혼합 가스가 거의 모두 반응하여 서브밀리미터 스케일의 협소한 공간에서도 촉매 연소 반응이 활발히 일어나는 것을 알 수 있었다.

공급 유량을 증가시킬수록 고온 영역의 면적과 연소기의 평균 온도가 증가하였다. 당량비를 낮추면 반응 영역의 면적이 넓어지는 효과가 있었다. 백금을 적게 사용하여도 반응성에는 변화가 없었다. 이는 연소기를 제작할 때 비용을 절감할 수 있음을 뜻한다. 특히 연소기 구동 초기에 일어날 수 있는 성능 저해 요소인 반응 멈춤 현상을 방지하기 위해서는 공급 유량을 늘리고 당량비를 낮추는 방법이 효과적임을 알 수 있었다.

그러나 수행한 모든 실험 조건에서 연소기 입구 근처에서 대부분의 반응이 일어나 온도 분포에 심한 불균형이 나타났다. 이는 연소기 제어

파라미터의 변화만으로는 균일한 온도 분포를 얻을 수 없고 연소기의 설계 변화를 통하여 해결하여야 함을 뜻한다. 온도 분포의 불균형은 구조물에 심각한 열적 응력을 가하게 되며 마이크로 스케일의 경우는 구조물을 운용할 수 없을 정도로 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 추후 전체 크기가 마이크로 스케일로 소형화된 연소기의 개발을 위해서는 온도 불균형 문제를 해결하는 연소실의 설계에 관한 연구가 필요하다.

## 후 기

이 연구는 연소기술 연구센터(CERC)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- [1] 나한비, 권세진, 김세훈, 이대훈, “초소형 정적 연소기에서의 연소 한계에 대한 실험적 연구,” *한국추진공학회지* 제7권 4호, 2003, pp.27-32.
- [2] 최원영, “마이크로 스케일 촉매 연소기에서의 수소-공기 예혼합 가스의 연소 특성,” 한국과학기술원 석사학위논문, 2005.
- [3] 최원영, 권세진, “전환율 측정을 통한 10mm 스케일 촉매 연소기에서의 수소-공기 예혼합 가스의 연소 특성 관찰,” *한국연소학회 2005년도 춘계학술대회 논문집*, 2005, pp.186-190.
- [4] 진학제, 서 곤, “촉매개론 제 4판”, 한림원, 서울, 2002.
- [5] 최성재, “입방 메조구조 실리카 주형을 이용한 구조규칙성 나노포러스 탄소의 합성,” 한국과학기술원 석사학위논문, 2002.
- [6] F. P. Incropera, David P. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [7] I. Wierzb, “Catalytic Oxidation of lean homogeneous mixtures of hydrogen /hydrogen-methane in air,” *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Vol.29, 2004, pp.1303-1307.