

## 마이크로 추력기 응용을 위한 과산화수소 촉매 분해 반응

안성용\* · 이종광\* · 랑성민\* · 권세진\*\*

### Catalytic Decomposition of Hydrogen Peroxide for Application on Micro Propulsion

SungYong An\* · Jongkwang Lee\* · Seongmin Rang\* · Sejin Kwon\*\*

#### ABSTRACT

An experimental investigation of a microthruster using hydrogen peroxide as a monopropellant is described. The study comprises of preparation method of silver as a catalyst and performance evaluation of a catalytic reaction chamber. Silver was reduced in H<sub>2</sub> environment at 500 °C. The catalytic reaction chamber was tested to determine the optimum configuration of the catalyst bed. The catalyst bed was made of a glass wafer substrate sputtered with silver and had a length of 20 mm. The conversion rate was measured with various residence time, catalyst bed temperature, catalytic coated area.

#### 초 록

과산화수소를 단일추진제로 사용하는 마이크로 추력기를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 연구에서 은 촉매 활성화 방법과 촉매 반응 챔버의 성능평가에 관한 실험을 하였다. 활성화를 위해 수소 환원법을 실시하였으며 500 °C의 환원 온도의 경우 가장 좋은 반응성을 가짐을 확인하였다. 촉매 분해 반응 연구를 위해 촉매 반응기가 제작되었다. 촉매 베드를 위해 지지체로 20 mm 길이의 유리 웨이퍼를 준비하여 은 촉매를 스퍼터링 하였다. 추진제의 체류시간, 촉매 베드 온도, 촉매 코팅 면적을 변화시키며 추진제 전환율을 측정하였다.

Key Words: Microthruster(마이크로 추력기), Monopropellant(단일추진제), Hydrogen peroxide(과산화수소), Silver(은), catalyst(촉매), Activation(활성화), Reactor(반응기), Sputter(스퍼터)

\* 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과  
연락처, E-mail: melody@kaist.ac.kr

최근 반도체 공정을 이용한 미세가공공정 (MEMS) 기술의 발달로 기존의 장치를 소형화 시키려는 연구가 시도되어 왔으며 각 분야별로 이를 접목한 연구가 활발히 진행 중이다.

미세화 가능성이 현실화 되면서 우주분야에 있어 마이크로 위성체의 개념이 생겨났다[1]. 이는 단일 대형위성을 운용하는 기존의 개념과 달리 마이크로 위성들을 집단으로 운용하는 개념으로 임무 성공률을 향상시키면서 동시에 발사 비용 및 위성체 제작 단가 감소의 장점이 있다. 특히, 마이크로 위성의 고도 및 자세제어를 위한 추력장치 개발은 마이크로 위성의 실용화에 차지하는 비중이 크다. 이런 경향에 따라 마이크로 고체추진제 추력기[2], 마이크로 단일추진제 추력기[3], 마이크로 이중 추진제 추력기, 기타 전기·전자적 방법을 이용한 추력기 등 여러 가지 형태의 마이크로 추력기와 추력기를 위한 기초 연구가 진행 중이다. 마이크로 단일추진제 추력기는 재사용 및 추력조절이 용이하고 사용가능한 추력 범위가 넓을 뿐 아니라 이중 추진제 추력기에 비해 구조가 단순하여 무게가 가벼운 장점이 있다.

현재 마이크로 단일추진제 추력기를 연구하는 그룹으로는 NASA와 Vermont 대학의 공동연구 그룹과 중국의 칭화 대학 내 연구 그룹 등이 있다. Hitt et al.[4]의 연구는 마이크로 추력기의 제작은 이루어졌으나 추진제가 완전히 분해되지 않고 액상의 추진제가 노즐로 분사되는 문제점이 있다. Xupeng et al.[5]은 추진제 분해를 위해 고체상의 촉매가 아닌 액상의 촉매를 사용한다. 촉매를 추진제와 같이 주입해서 반응시키므로 촉매가 반응 후 생성물과 같이 노즐을 통해 배출되는데 이 경우 단일추진제 추력기의 장점을 살리지 못한다.

단일추진제 마이크로 추력기는 일반적으로 인젝터(injector), 반응기, 노즐의 세 부분으로 구성된다. 이 중 반응기는 추진제를 분해 시켜 적절한 압력과 온도를 가지는 가스를 생성시키는 부분으로 단일추진제 마이크로 추력기의 추력 성능을 결정하는 핵심요소이다. 본 연구에서는 단

일추진제 마이크로 추력기의 세 요소들 가운데 촉매 반응기에 관한 연구를 수행하였다.

마이크로 추력기는 장치의 크기에 많은 제약이 있어서 다양한 물리량을 측정할 수 있도록 프로브를 설치하는데 어려움이 따른다. 따라서 실험 데이터 측정 및 반응 현상의 관찰이 용이한 적절한 크기의 촉매 반응기를 제작하였으며 반응기 작동 파라미터에 관한 연구를 하였다.

추진제는 다루기 쉬우면서 친환경적 연료로 관심을 받고 있는 과산화수소를 증류하여 90wt%로 제작하여 사용하였다. 추진제 분해를 위한 촉매는 은(Ag)을 선택하여 촉매의 적절한 활성 조건에 관한 실험을 하였다. 반응기 실험에서 추진제 유량 및 촉매 베드 온도를 변화시켜 가며 촉매 반응기의 성능평가를 하였다.

## 2. 촉매 특성

### 2.1 촉매 선정

마이크로 추력기에 사용하기 위한 촉매 선정에 있어 고려해야 할 사항은 촉매의 반응특성, 수명, 녹는점, 시동 특성, 제조 용이성, 지지체에 코팅가능 여부, 코팅의 재연성 및 MEMS 공정과 호환성이다. 여러 조건을 고려하여 적합하다고 판단되는 은(Ag)을 촉매를 선택하였다. 은의 경우 실제로 추력기 및 가스 발생기에 사용되는데 [6] 반응특성이 우수하고 단일 촉매이므로 합성 촉매에 비해 획득하기 쉽다. 또한 스퍼터를 이용하면 MEMS 공정과 호환되므로 추후 마이크로 추력기 구조물 제작에 있어 유리하며 원하는 촉매 두께를 재연성 있게 증착할 수 있다.

### 2.2 촉매 코팅 및 시편 제작

촉매의 코팅을 위한 지지체는  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ , 2500 cell/inch<sup>2</sup>의 셀 밀도를 가지는 SUS 메쉬(mesh)를 이용하였다. 준비된 시편에 티타늄(Ti) 500 Å, 은(99.99%)을 5 μm 두께로 코팅하였다.

과산화수소 분해 반응에서 은 촉매는 순수 은일 경우 활성 상태이나 대기 중에 노출되면 산

소원자가 은 표면에 흡착되어 산화막이 형성되는데 이는 촉매의 반응성을 크게 감소시킨다[4]. 따라서 촉매를 활성화시키기 위해서는 산화막 제거 및 형성을 억제해야 한다.

본 연구에서는 촉매의 활성화 조건을 찾기 위해 고온의 수소 분위기에서 환원시키는 방법을 시도하였다. 이 방법은 몇몇 금속 촉매에 사용된 방법으로 촉매 표면에 흡착된 산소원자가 고온에서 수소와 반응하여 탈착 되는 것을 이용하는 것으로[8,9] 본 연구에서 환원온도를 변화시키며 활성화 가능 여부를 검증하고 최적의 온도를 찾았다. 환원 후 표면에 산화막이 형성되는 것을 최소화하기 위해 반응 실험 전까지 수소-질소 혼합가스 챔버에 보관하였다.

### 23 촉매 활성화 실험

이상적인 과산화수소 분해 반응에서 생성물은 기상의 수증기와 산소이다. 이 때 분해 반응의 특성은 촉매 종류, 촉매의 활성화 정도, 반응 온도 등의 영향을 받는데 본 연구에서는 활성화 방법을 찾기 위해 다른 조건을 고정하고 활성화 조건을 변화시켜가며 챔버에서 반응 실험을 수행하였다. 촉매의 활성화 정도에 따라 반응 속도에 차이가 존재하므로 시간에 따른 챔버 압력 변화를 분석하면 활성화된 정도를 간접적으로 비교할 수 있고 최적의 활성화 조건을 찾을 수 있다.

실험은 90%wt 농도의 과산화수소 10 g을 촉매 시편이 장착된 챔버 분사하여 시간에 따른 챔버 압력을 Fig. 1의 실험 장치로부터 측정하였다.

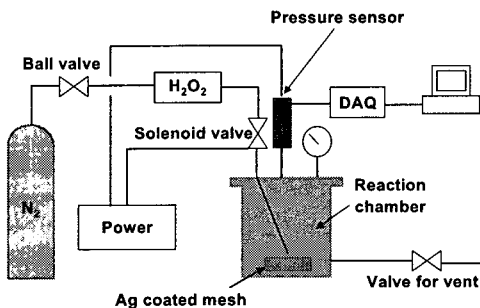


Fig. 1 Experimental setup.

### 24 실험결과

Figure 2는 챔버 압력 결과를 나타낸다. 각 시편은 상온에서 7일간 인위적으로 산화시킨 후 환원 과정을 거쳤으며 실험결과 환원 온도와 상관없이 활성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 500 °C에서 환원한 경우 반응 지연이 가장 짧고 상승된 압력도 비교적 높게 나타나 환원온도로 적합하다.

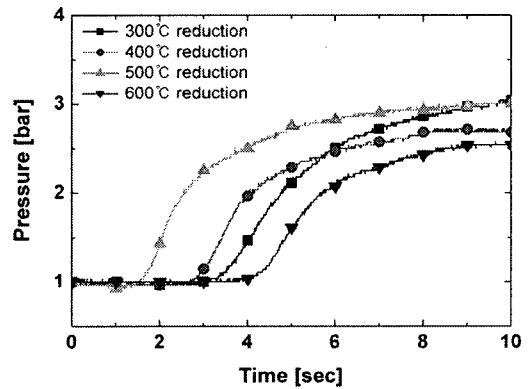


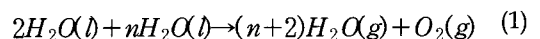
Fig. 2 Effects of various reduction temperature

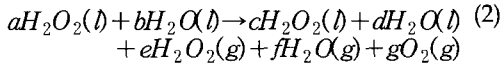
## 3. 촉매 반응기

### 3.1 실험원리

제작된 추력기가 설계한 성능을 내기 위해서는 주입한 추진제가 완전히 분해 되어 가스 상태로 배출되어야 한다. 따라서 본 반응기 실험의 목적은 연료의 완전한 분해를 위해 필요한 추진제의 체류시간을 찾는 데 있으며 추진제가 분해된 정도를 나타내는 전환율을 측정하였다. 또한 베드 길이를 고정시킨 후 유량을 변화시켜가며 실험하는 방법을 택했다.

과산화수소의 이상적인 분해 반응은 Eq. 1과 같다. 추진제의 농도에 따라 n 값이 결정된다. 반응의 중간 단계에서 생성물은 액상의 물과 과산화수소, 기상의 수증기와 과산화수소 및 산소이다.(Eq. 2)





추진제의 전환율을 보기 위해 기상의 생성물을 수집한 후 수증기와 과산화수소는 응축시키고 산소의 유량을 측정하여 이론적으로 발생하는 산소 유량을 비교하여 전환율을 계산하였다.

실험에서 작동 파라미터는 연료가 반응기 내에 머무르게 되는 체류시간 및 예열 온도이다. 체류시간에 따라 추진제가 촉매와 반응하는 시간이 다르므로 전환율이 변하며 Eq. 3과 같다.

$$\tau = \frac{\text{Reactor volume}}{\text{Fuel flowrate}} = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

### 3.2 촉매 반응기

전환율 측정을 위해 촉매 반응기를 제작하였다. 반응 챔버는 촉매 시편을 넣었을 경우 내부 부피가 0.4 cc가 되도록 하였고 촉매층 위에 연료가 균일하게 흘러가도록 하기 위해 추진제 주입구에 3개의 유로를 제작하였다. 반응 시 생성물 및 체류시간 동안 반응하지 못한 연료는 출구를 통해 나가게 된다.

촉매 지지체로는 유리 웨이퍼를 이용하여 표면적 기본면적 2 cm<sup>2</sup>으로 제작하고 추가적으로 4, 6, 8, 14.98 cm<sup>2</sup>을 형성하였다. 촉매는 5 μm 두께로 증착하였다. 반응에 부정적인 요소가 될 수 있는 불순물 또는 산화막 형성 여부를 확인하기 위해 제작한 시편을 X선 회절분석기(XRD)로 조사하여 순수 은 촉매임을 확인하였다.

### 3.3 실험 및 결과

촉매 시편이 장착된 반응기 형상 및 실험장치 구성은 Fig. 3, 4와 같다. 정밀 유량으로 추진제를 공급하기 위해 미량펌프(KDS 100)를 이용하여 3~20 cc/hr 으로 공급하였다. 사용한 촉매시편의 코팅 표면적은 2 cm<sup>2</sup>이다. 공급 유량 및 예열 온도에 따른 전환율은 Fig. 5와 같다.

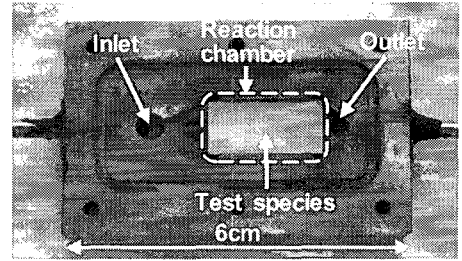


Fig. 3 Mesoscale reactor.

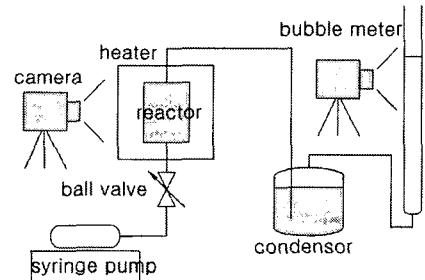


Fig. 4 Experimental setup.

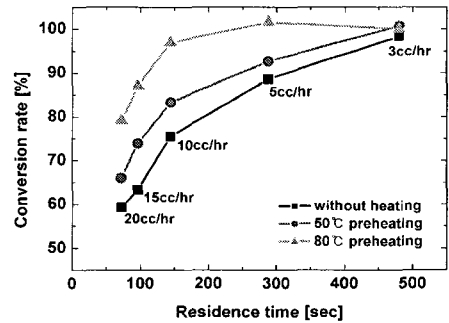


Fig. 5 Residence time vs. conversion rate. (2 cm<sup>2</sup>)

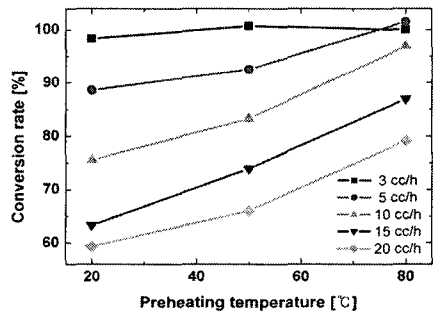


Fig. 6 Preheating temperature vs. conversion rate. (2 cm<sup>2</sup>)

반응 실험 결과 체류시간이 증가할수록 반응 시간이 증가하여 전환율이 증가하는 경향을 보였다. 체류시간이 작은 값을 가지는 범위는 전환율이 증가하는 기울기가 크지만 전환율이 증가함에 따라 상승 기울기가 완만해진다. 이는 반응기 내에 반응물과 액상의 생성물이 같이 섞여 있는데 반응물의 비율이 높을수록 반응물이 촉매와 반응할 수 있는 조건이 되어 전환율의 상승 정도가 큰 것으로 판단된다.

예열 없이 상온에서 반응시험 한 경우 체류시간이 480초 이상 보장 되어야 하나 이는 예열 온도에 따라 감소한다. 80 °C로 예열한 후 반응시킨 경우 완전한 전환율을 얻는데 필요한 체류시간이 288초로 감소하였고 초기 반응 지연 현상이 거의 나타나지 않았다. 이는 온도가 높을수록 추진제에 포함되어 있거나 반응 후 생긴 물이 기화되기 좋은 조건이 형성되어 반응속도가 증가하므로 같은 전환율을 얻는데 필요한 체류시간이 감소하였기 때문이다. Fig. 6은 초기 예열 온도에 따른 전환율을 나타낸다. 온도 상승에 따라 전환율이 선형에 가깝게 증가하지만 전환율의 기울기가 조금 더 커지는 경향을 보인다. 이는 촉매로 인한 분해 외에 온도 상승에 따라 열분해의 영향이 나타나기 때문으로 판단된다.

480초의 긴 체류시간은 추력기에서 사용하기에 적합하지 않다. 따라서 반응성을 높이기 위해 같은 반응기에서 촉매 코팅면적을 증가시키면서 실험하였다. Fig. 7은 촉매 면적 증가에 따른 전환율 결과이다. 선택한 체류시간은 72초로 각 면적에 대하여 동일하게 적용 시켰으며 초기 예열은 실시하지 않았다. 면적 증가에 따라 전환율이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 8 cm<sup>2</sup>의 촉매 면적을 가질 경우 추진제의 완전한 분해를 위해 요구되는 체류시간은 72초까지 감소함을 확인하였다.

1.5 mm 직경을 가지는 비드에 촉매를 코팅하여 14.98 cm<sup>2</sup> 면적에서 추가 실험을 수행한 후 2 cm<sup>2</sup>에서 실험 결과와 비교하였다.(Fig. 8) 필요한 최소 체류시간은 63초 이다. 비드를 촉매 지지체로 이용할 경우 비드의 직경과 개수에 따

라 촉매 면적을 쉽게 조절할 수 있으며 면적 증가가 용이하다. Fig. 5와 비교할 때 촉매 면적 증가를 이용한 반응성 향상 방법은 체류시간에 따른 전환율의 기울기 변화가 크다. 반면 초기 예열 온도를 변화시킬 경우 요구되는 체류시간이 감소하기는 하지만 체류시간에 따른 전환율 기울기 정도는 큰 변화 없이 전환율만 상승되는 경향을 보인다.

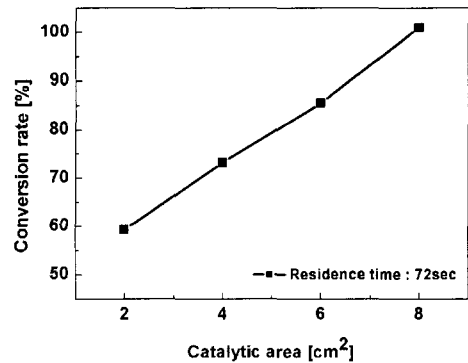


Fig. 7 Catalytic area vs. conversion rate at 72s residence time.

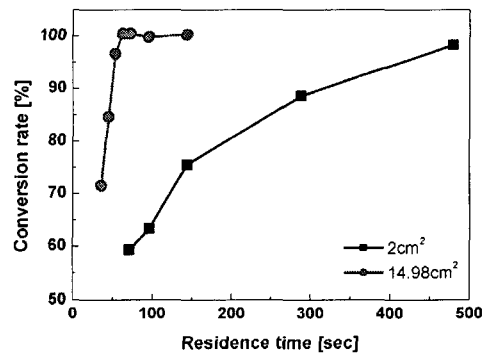


Fig. 8 Residence time vs. conversion rate. (2 cm<sup>2</sup>, 14.98 cm<sup>2</sup>)

## 5. 결 론

본 연구는 과산화수소 촉매 분해를 이용한 마이크로 단일추진제 추력기 개발의 초기과정으로서 선정된 촉매 활성화, 촉매 반응기에 대한 성

능 평가 및 파라미터 연구가 수행되었다.

마이크로 추력기에 사용하기 적합한 박막 촉매의 활성화를 위해 수소 환원법을 검증하였으며 500 °C 환원 온도에서 가장 좋은 성능을 나타내었다.

제작된 촉매 반응기에서 추진제의 전환율을 측정하였다. 전환율을 증가를 위해 체류시간 증가, 초기 예열 온도 상승, 촉매 코팅 면적을 증가의 세 가지 방법을 이용할 수 있으며 이들에 대한 영향 고찰하기 위해 실험적 접근 방법을 이용하였다.

추력기의 요구 특성 상 체류시간을 증가를 이용한 전환율 증가는 적합하지 않으며 촉매 베드의 초기 예열, 촉매 면적 증가가 적합한 방법으로 판단된다. 또한 예열보다는 촉매 면적 증가가 더 효율적이었다.

2 cm<sup>2</sup>의 촉매 코팅 면적을 가지는 경우 냉시동 (cold start)에서 480초 이상의 체류시간이 요구되나 80 °C로 베드를 가열할 경우 필요한 체류시간이 288초까지 감소하였다. 또한 베드 예열 없이 촉매 면적만 변화시킨 경우 14.98 cm<sup>2</sup>에서 63초의 체류시간이 보장되어야 추진제의 완전한 분해가 이루어졌다.

따라서 추후 추력기 제작 시 한정된 반응 공간에서 코팅된 촉매 면적을 최대로 하는 것이 중점적 사안이며 촉매를 적절한 온도로 예열하는 것 또한 마이크로 추력기용 촉매 반응기의 중요한 작동 파라미터가 됨을 확인하였다.

현재 이들 실험 결과를 바탕으로 한 프로토타입의 마이크로 추력기 제작 및 성능평가에 대한 연구가 진행 중이다.

## 참 고 문 헌

1. SWALES AEROSPACE, "Final Report - Nanosat Dispenser Ship Performance Feasibility," SAI-RPT-284, 1999
2. Jongkwang Lee, Dae Hoon.Lee, Sejin Kwon "Design and performance evaluation of components of micro solid propellant thruster," 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004
3. 조정훈, 이대훈, 권세진, "밀리미터 스케일의 이상 분해 반응기에 대한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 B, 제28권 3호, 2004, pp.265-270
4. Darren L Hitt, Charles M Zakrzwski, Michael A Thomas, "MEMS-based satellite micropropulsion via catalyzed hydrogen peroxide decomposition," *Smart Materials and Structures*, October, 2001, pp.1163-1175
5. Chen Xupeng, Li Yong, Zhou Zhaoying, Fan Ruili, "A homogeneously catalyzed micro-chemical thruster," *Sensors and Actuators A* 108, 2003, pp.149-154
6. 이수림, 박주혁, 이충원, "100N급 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 단일 추진제 로켓 엔진의 개발," 한국추진공학회 추계학술대회, 2005, pp.159-167
7. T. C. F. Munday, L. R. Darbee, T. C. McCormick, "Investigation of Decomposition Catalyst for 98% Hydrogen Peroxide," USAF technical report AFRPL-TR-67-80, 1965
8. 최원영, 권세진, "밀리미터 스케일 촉매 연소기에서의 수소-공기 예혼합 가스의 촉매 연소 특성," 한국연소학회지, 제10권 1호, 2005, pp.20-26
9. Hyuckmo Kwon, Seongmin Rang, Sejin Kwon, "Study of Catalytic Decomposition for Hydrogen Peroxide Gas Generator," 41th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2005