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 that uses hydrogen peroxide as a monopropellant is described. The study comprises of preparation method of silver as a catalyst and performance evaluation of a mesoscale reactor. Reduction of silver in H_2 at 500 ℃ resulted in the best reactivity of all the treatment method tested. A mesoscale reactor was built to find the optimum configuration for full decomposition of propellant. The catalyst bed was made of a glass wafer substrate sputtered with silver and had a length of 20 mm. We measured the conversion rate with varying feed rate of H_2O_2 and preheating temperature. With the feed rate of H_2O_2, the space time within the reactor varies as well. For the bed length of 20 mm, space time more than 480 s was required for full conversion.

초 록

과산화수소를 단일추진제로 사용하는 마이크로 추력기를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 연구에서 은 촉매 활성화 방법과 메조스케일 반응기의 성능평가에 관한 실험을 하였다. 시도한 여러 가지 활성 방법 중, 500 ℃의 수소 환원법의 경우 가장 좋은 반응성을 가짐을 확인 하였다. 추진제의 완전한 분해 조건을 찾기 위해 메조스케일 반응기가 제작되었다. 촉매 베드를 위해 지지체로 20 mm 길이의 유리 웨이퍼를 준비하여 은 촉매를 스퍼터링 하였다. 과산화수소 공급 유량에 따라 반응기내 공간시간이 변하므로 유량을 변화시키며 반응기 실험을 수행하였고 전환율을 측정 하였다. 20 mm 베드 길이에서 추진제의 완전한 분해를 위해 480초 이상의 공간시간이 요구된다.

Key Words: Microthruster(마이크로 추력기), Monopropellant(단일추진제), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Silver Catalyst(은 촉매), Activation(활성화), Reactor(반응기)

† 2005년 8월 29일 접수 ~ 2005년 11월 21일 심사완료
* 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
연락저자, E-mail: melody@kaist.ac.kr

1. 서 론

최근 반도체 공정을 이용한 미세가공공정(MEMS) 기술의 발달로 기존의 장치를 소형화 시키려는 연구가 시도되어 왔다. 기존의 기계 가공으로는 제작 가능한 크기와 오차에 한계로 인해 제품의 소형화에 어려움이 있었으나, 미세가공공정 기술을 이용하면 그 한계를 극복할 수 있어 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, 마이크로 콜드 가스 추력기[4], 기타 전기·전자적 방법을 이용한 추력기 등 여러 가지 형태의 마이크로 추력기와 추력기를 위한 기초연구가 진행 중이다. 이 중 마이크로 단일추진제 추력기는 재사용 및 추력조절이 용이하고 사용가능한 추력 범위가 넓을 뿐 아니라 이중 추진제 추력기에 비해 구조가 단순하여 무게가 가벼운 장점이 있어 본 연구에서 채택하였다.

현재 마이크로 단일추진제 추력기를 연구하는 그룹으로는 NASA와 Vermont 대학의 공동연구 그룹과 중국의 칭화 대학 내 연구 그룹 등이 있다. Hitt 등[5]의 연구는 마이크로 추력기의 제작은 이루어졌으나 추진제가 완전히 분해 되지 않고 액상의 추진제가 노즐로 분사되는 문제점이 있다. Xupeng 등[6]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 Fig. 1과 같이 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. 따라서 본 연구는 단일추진제 마이크로 추력기 개발의 초기연구로서 추진제 분해용 촉매 및 반응기에 관한 연구를 수행하였다.

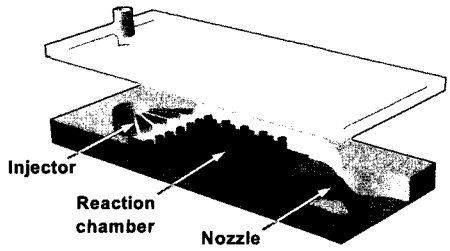

Fig. 1 Schematic of General Monopropellant Microthruster

마이크로 추력기 제작이 이루어지더라도 추력기의 크기를 고려할 때 반응기 압력, 온도 분포, 생성물의 조성 등과 같은 데이터 측정에 어려움이 있다. 따라서 실험 데이터 측정 및 반응 현상의 관찰이 용이한 메조스케일 촉매 반응기를 제작하였으며 반응기 작동 파라미터에 관한 연구를 하였다.

추진제는 다루기 쉬우면서 친환경적 연료로 관심을 받고 있는 과산화수소를 증류하여 고농도로 농축시켜 사용하였고, 추진제 분해를 위한 촉매는 은(Ag)을 선택하여 촉매의 적절한 활성 조건에 관한 실험을 하였다. 반응기 실험에서 추진제 유량 및 촉매 베드 온도를 변화시켜가며 메조스케일 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 촉매를 선택하였다. 은 촉매의 경우 실제로 추력기 및 가스 발생기에 사용되는데[7] 반응특성이 비교적 우수하고 단일 촉매이므로 합성 촉매에 비해 획득하기 쉽다. 추후 마이크로 추력기 구조물 제작에 있어 MEMS 공정상 웨이퍼를 사용하게 되는데 시드 레이어(seed layer)를 사용할 경우 접착력이 향상되어 은을 코팅하는 것이 가능하며, 스퍼터링(sputtering)으로 원하는 두께를 재연성 있게 증착할 수 있다.

2.2 촉매 코팅 및 시편 제작

촉매의 코팅을 위한 지지체는 4×4 cm^2 의 크기, 2500 cell/$inch^2$의 셀 밀도를 가지는 스테인리스 스틸 메쉬(mesh)를 이용하였다. 준비된 지지체를 과산화수소와 황산을 1:1 비율로 섞은 용액에 10분간 표면처리를 하고 세척 하였다. 이후 스퍼터를 이용하여 양면에 티타늄(Ti)을 500 Å 증착시키고 은(99.99%)을 300 W, 5 mTorr 증착 조건에서 1시간 동안 코팅하였다.

과산화수소 분해 반응에서 은 촉매는 순수 은일 경우 활성 상태이나 대기 중에 노출되면 산소원자가 은 표면에 흡착되어 산화막이 형성되는데 이는 촉매의 반응성을 크게 감소시킨다[5]. 따라서 은 촉매를 활성화시키기 위해서는 산화막 제거 및 형성을 억제해야 하는데 일반적으로 질산(HNO_3) 또는 사마륨(Sm) 처리를 하는 것으로 알려져 있다[7, 8]. 사마륨은 강한 환원 특성을 가지는 금속으로 촉매 보관 및 추진제 분해 반응 중 촉매 표면에 산화막이 형성되는 것을 억제하기 위해 사용하는 것으로 판단된다.

촉매의 활성화 조건을 찾기 위해 처리 조건을 달리하여 시편을 제작하였다. 각 시편에 대한 처리 방법은 Table 1과 같다.

Case 1은 은을 스퍼터링 한 것이고, case 2, 3은 case 1을 반응 실험에 각각 1, 2회 사용한 후 50%wt 질산 용액에 5초간 담그는 방법으로 은 표면을 녹여서 산화막을 제거한 것이다. Case 4는 7일간 산화시킨 시편을 $Ag(NO)_3$과 $Sm(NO_3)_3$ 처리를 한 후 건조시킨 것이다[8]. Case 5, 6, 7, 8은 질산과 사마륨 처리를 하지 않고 고온의 수소분위기에서 환원 과정을 거쳤다. 이는 촉매 표면에 흡착된 산소원자가 고온에서 수소와 반응하여 탈착 되는데 이 방법으로 산화막을 제거함으로서 촉매가 활성화 되는지 확인하고자 함이다[9, 10]. 사용한 환원 조건은 상온에서 200 ℃/hr로 환원온도까지 상승시키고 6시간 동안 수소 분위기에서 환원한 후, 상온까지 자연 냉각 시켰다. 표면에 산화막이 형성되는 것을 최소화하기 위해 반응 실험 전까지 수소(4%vol)-질소 혼합가스 챔버에 보관하였다.

Table 1. Condition of Each Test Species

구 분	처 리 방 법
case 1	은 코팅 후 아무 처리 하지 않음
case 2	1회 반응 실험 후 질산 처리
case 3	2회 반응 실험 후 질산 처리
case 4	$Ag(NO)_3$ 및 $Sm(NO_3)_3$ 처리
case 5	7일간 산화 후 300℃에서 환원
case 6	7일간 산화 후 400℃에서 환원
case 7	7일간 산화 후 500℃에서 환원
case 8	7일간 산화 후 600℃에서 환원
case 9	7일간 산화

2.3 촉매 활성화 실험

이상적인 과산화수소 분해 반응에서 생성물은 기상의 수증기와 산소이며 반응식은 Eq. 1과 같다.

$$H_2O_2(l) \rightarrow H_2O(g) + \frac{1}{2} O_2(g) + heat \qquad (1)$$
$$heat = 54.24\,kJ/mol$$

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. 촉매는 활성 정도

에 따라 반응성에 큰 차이가 있어 다른 조건이 모두 같더라도 활성 정도가 다르면 메조 스케일 반응기 실험을 할 때 서로 다른 성능을 보일 수 있으므로 활성화 조건에 관한 실험이 선행되어야 한다. 활성화 정도는 시간에 따른 챔버 압력 변화를 분석하면 간접적으로 비교할 수 있고 최적의 활성화 조건을 찾을 수 있다. 실험 방법은 다음과 같다. 90%wt 농도로 증류된 과산화수소를 0.25인치 직경을 가지는 관에 10 g 채운 후 입·출구를 밸브로 차단한다. 챔버 내에 촉매 시편을 장착하고 질소가스로 가압하여 과산화수소를 챔버로 이동시킨다. 반응 챔버와 연료 사이의 밸브는 솔레노이드 밸브와 타이머를 이용하여 10 g의 과산화수소를 상온상태에서 0.25초간 주입하였다. 추진제 주입 시 질소 챔버로 가압되므로 반응 챔버의 압력이 0.1 bar 정도 상승하게 되는데 실험결과에서는 압력 상승 폭 만큼 보정하여 나타내었다. 각 시편별 반응 특성을 비교하기 위해 시간에 따라 챔버 압력을 측정하였다. 챔버 내 크기는 10 cm(직경) × 12.5 cm(높이)이다. 실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다.

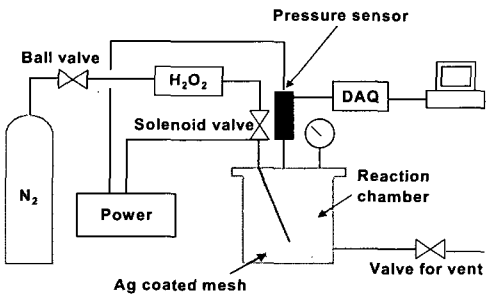

Fig. 2 Experimental Setup

2.4 실험결과

Figure 3은 HNO_3과 $Sm(NO_3)_3$ 처리를 한 촉매 실험결과로 초기 분해 성능을 나타낸다. $Sm(NO_3)_3$ 처리를 한 경우를 제외한 case 1, 2, 3의 경우에 압력 곡선의 경향이 비슷하게 나타났다. 연료 주입 후 활발한 반응이 일어나기까지 어느 정도 지연시간이 있고, 이후 반응이 진행됨에 따라 압력이 빠른 속도로 상승하게 된다. 그리고 주입된 추진제 양이 줄어들면서 압력 상승률이 감소하게 되는 경향을 보인다. 별도의 처리 과정을 거치지 않은 은을 이용하여 반응 실험한 후(case 1) 질산 처리를 거쳐 다시 반응시켜 본 결과(case 2) 첫 번째 반응보다는 낮은 성능을 보이지만 활성화되는 것을 확인 할 수 있다. 2회의 반응 실험 후 질산 처리를 한 경우(case 3) 마찬가지로 활성화 되지만 질산 처리 시 촉매의 손실로 반응 성능이 줄어드는 현상을 확인하였다. 따라서 질산 처리를 통해 은을 활성화 할 수 있지만 전체적인 성능을 고려할 때 바람직하지 않다. 이미 사용한 촉매를 활성화시켜 재사용할 경우 반응지연 시간이 감소하는 경향을 보인다. 이는 격렬한 분해 반응이 촉매 표면의 거칠기와 세공의 형성에 영향을 줘서 웜업(warm-up) 시켜주는 효과로 볼 수 있다. $Ag(NO)_3$과 $Sm(NO_3)_3$로 처리 한 경우(case 4) 반응성이 매우 낮아 압력 상승이 매우 작다.

Figure 4는 활성화에 요구되는 최적의 환원 온도를 구하기 위해 각각 다른 온도에서 환원 시킨 후 반응성을 비교한 그래프이다. 각 시편은 상온에서 7일간 인위적으로 산화시킨 후 환원 과정을 거쳤다. 실험결과 환원 온도와 상관없이 활성을 보이는 것을 확인하였다. 500 ℃에서 환원한 경우(case 7) 반응지연 시간이 가장 짧았으며 상승된 압력도 비교적 높게 나타나 환원 온도로 적합하다.

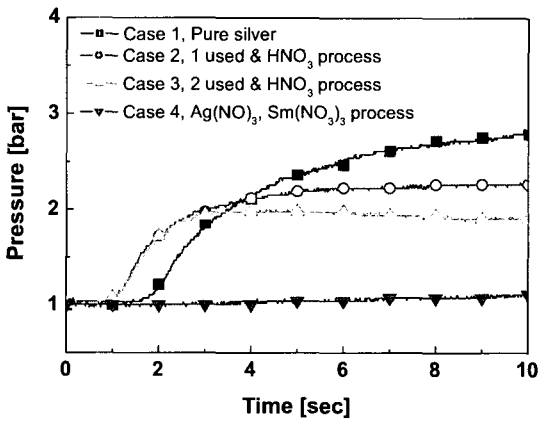

Fig. 3 Effect of HNO_3 and $Ag(NO)_3/Sm(NO_3)_3$

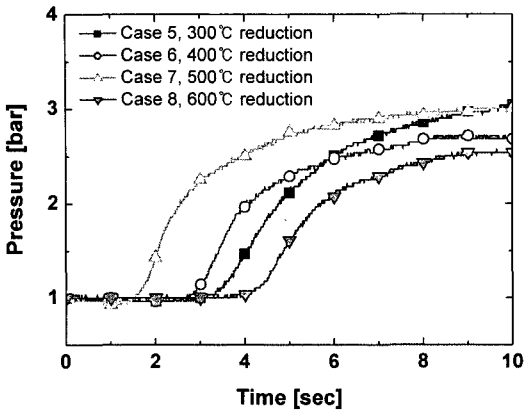

Fig. 4 Effect of Various Reduction Temperature

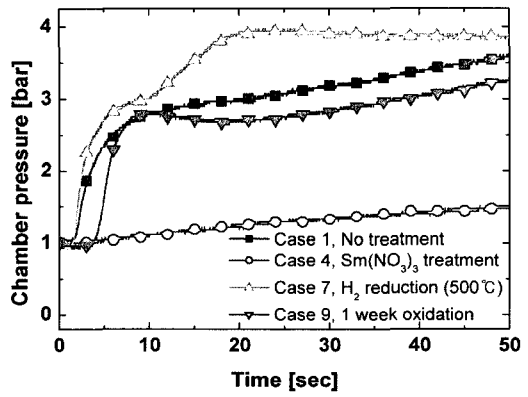

Fig. 5 Summary of Each Case

순수 은(case 1), $Ag(NO)_3$과 $Sm(NO_3)_3$로 코팅한 경우(case 4), 500 ℃에서 환원 시킨 경우(case 7) 및 7일간 산화시킨 경우(case 9)에 대한 결과를 Fig. 5에서 비교하여 나타내었다. 산화막이 형성되기 시작한 case 9는 순수 은의 반응성과 비교할 때 반응지연이 크고 반응성이 낮다.

3. 메조스케일 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 추진제의 완전한 분해를 위해 필요한 반응기 운용조건을 결정하는데 있으며 추진제가 분해 된 정도를 나타내는 전환율을 측정하였다. 이에 대한 실험적 접근법으로는 유량을 고정 시킨 후 베드 길이를 변화시키는 경우와 베드 길이를 고정시킨 후 유량을 변화시켜가며 실험하는 방법이 있는데 본 연구에서는 실험의 용이성을 고려하여 후자를 택했다.

과산화수소의 이상적인 분해 반응은 Eq. 2와 같다. 과산화수소는 100% 농도로 획득하는데 어려움이 있고 일반적으로 물과 혼합되어 있다. 따라서 추진제의 농도에 따라 다른 n 값을 가진다. 반응의 중간 단계에서 생성물은 Eq. 3과 같이 액상의 물과 과산화수소, 기상의 수증기와 과산화수소 및 산소이다.

$$2H_2O_2(l)+nH_2O(l)\rightarrow(n+2)H_2O(g)+O_2(g) \quad (2)$$

$$aH_2O_2(l)+bH_2O(l)\rightarrow cH_2O_2(l)+dH_2O(l) +eH_2O_2(g)+fH_2O(g)+gO_2(g) \quad (3)$$

추진제의 전환율을 보기 위해서는 Eq. 3의 반응식에서 각 계수를 구해서 비교해도 되지만 이 경우 액상과 기상의 생성물을 모두 수집해서 농도를 분석해야 하므로 과정이 복잡하고 실험값에 오차가 포함될 가능성이 크다. 본 실험에서는 기상의 생성물만을 수집하고 수집한 생성물 중 수증기와 과산화수소는 응축시키고 산소의 유량을 측정하였다. 측정한 산소의 유량과 주입한 과산화수소에서 이론적으로 발생하게 되는 산소 유량을 비교하면 전환율을 계산할 수 있다.

본 반응기 실험에서 작동 파라미터는 공간시간(space time) 및 예열 온도이다. 공간시간에 따라 추진제가 흘러가는 속도에 차이가 있어 촉매와 반응하는 시간이 다르므로 전환율이 변하게 된다. 공간시간은 반응기 부피와 주입구에서 추진제 공급 유량에 따라 결정되는데 Eq. 4 식으로 쓸 수 있다. 촉매 베드를 예열함에 따라 반응성이 향상되는데 이 외에도 반응지연 시간 감소, 낮은 온도에서 시동(cold start) 지양으로 인한 촉매 수명 증가 등의 효과를 얻을 수 있다.

$$\tau = \frac{Reactor\ volume}{Fuel\ flowrate} = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

3.2 메조 스케일 반응기

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

시편은 유리 웨이퍼를 2×1 cm^2 크기로 자른 후 은 촉매 접착력을 향상시키기 위해 티타늄 500 Å를 증착한 후 은을 5 ㎛ 두께로 증착하였다. 증착 조건은 300 W 파워, 5 mTorr의 작동 압력에서 아르곤 유량은 20 cc/min이다. Fig. 6은 주사전자현미경으로 찍은 시편의 표면 및 단면 형상이다. 스퍼터링 시 반응에 부정적인 요소가 될 수 있는 불순물 또는 산화막 형성 여부를 확인하기 위해 제작한 시편을 X선 회절분석기(XRD)로 조사하여 스퍼터링 된 촉매의 패턴이 순수 은의 XRD 패턴과 동일함을 확인하였다. Fig. 7은 XRD 결과이다.

3.3 실험 및 결과

촉매 시편이 장착된 반응기 형상 및 실험장치 구성은 Fig. 8, 9와 같다. 정밀 유량으로 추진제를 공급하기 위해 미량펌프(KDS 100)를 이용하였으며 산소를 제외한 액상 및 기상의 생성물은 응축기에서 저장되고 산소는 응축기를 거쳐 유량계를 통해 외부로 방출된다. 공급유량은 3, 5, 10, 15, 20 cc/hr 이며 반응실험에 앞서 촉매를 수소 환원법으로 활성화 시켰다.

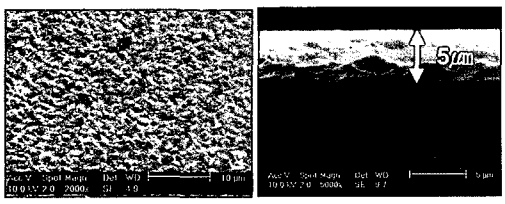

Fig. 6 SEM Images of Test Species

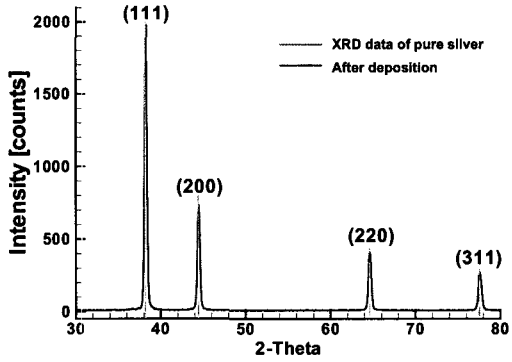

Fig. 7 XRD Results of Test Species

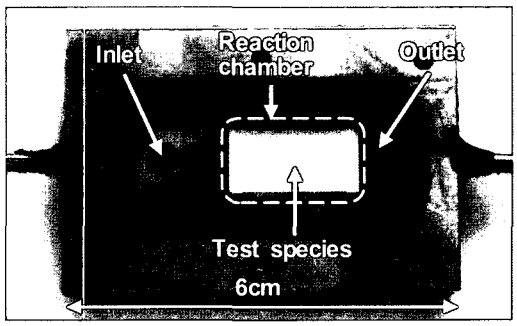

Fig. 8 Mesoscale Reactor

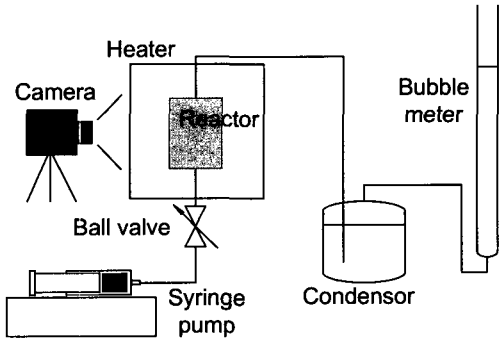

Fig. 9 Experimental Setup

공급 유량 및 예열 온도에 따른 전환율 결과는 Table 2와 같다. Fig. 10은 예열 온도와 유량 변화에 따른 전환율을, Fig. 11은 공간시간 변화에 따른 전환율 결과를 나타내며 공간시간은 Eq. 4를 통해 계산하였다.

Table 2. Reactor Test Results

유 량	공간시간	전환율 [%]		
[cc/hr]	[sec]	20℃	50℃	80℃
3	480	98.3	100.7	100.4
5	288	88.6	92.6	101.5
10	144	75.5	83.3	96.9
15	96	63.3	73.9	87.0
20	72	59.3	66.0	79.1

반응 실험 결과 공간시간이 증가할수록 반응시간이 증가하여 전환율이 증가하는 경향을 보였다. 특히 Fig. 11에서 공간시간이 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 공간시간이 480초 이상 보장 되어야 함을 확인하였는데, 예열을 하면 이 값이 감소한다. 80 ℃로 예열한 후 반응시킨 경우 완전한 전환율을 얻는데 필요한 공간시간이 288초로 감소하였고 초기 반응지연 현상이 나타나지 않았다. 이는 온도가 높을수록 추진제에 포함되어 있거나 반응 후 생긴 물이 기화되기 좋은 조건이 형성되어 반응속도가 증가하여 같은 전환율을 얻는데 필요한 공간시간이 감소하기 때문이다.

Figure 12는 초기 예열 온도를 가로축으로 표시한 그래프이다. 온도 상승에 따라 전환율이 선형에 가깝게 증가하지만 전환율의 기울기가 조금 더 커지는 경향을 보인다. 이는 과산화수소의 추진제 특성과 관련이 있다. 과산화수소는 촉매반응 외에 스스로 열분해하게 되는데 상온에서 열분해 되는 정도는 미약하여 무시할 수 있는 수준이다. 그러나 온도 상승에 따라 열분해 정도가 증가하므로 20 ℃에서 50 ℃로 증가할 경우보다 50 ℃에서 80 ℃로 증가한 경우 열분해의 영향으로 반응이 진행되어 전환율이 조금 더 높게 나타난 것으로 판단된다.

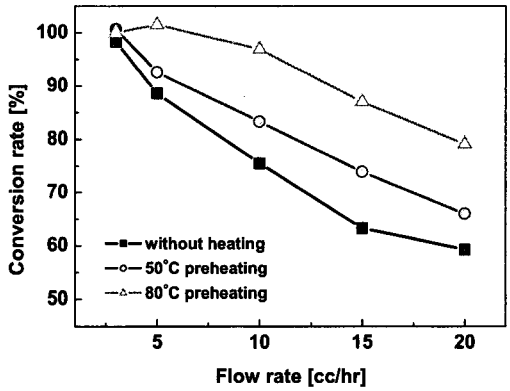

Fig. 10 Flowrate vs. Conversion Rate

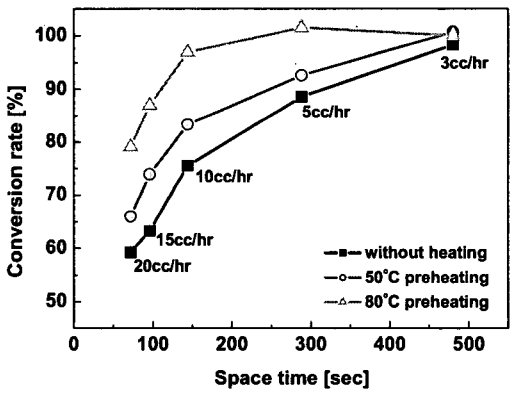

Fig. 11 Space Time vs. Conversion Rate

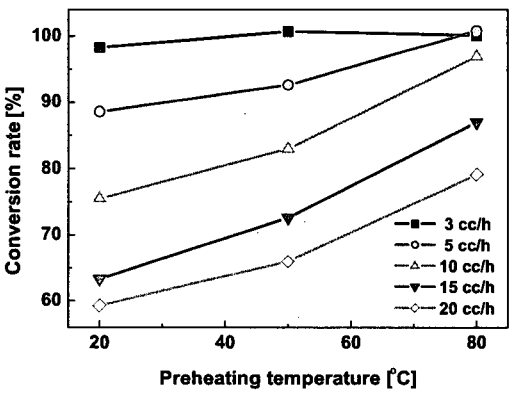

Fig. 12 Preheating Temperature vs. Conversion Rate

5. 결 론

본 연구는 과산화수소 촉매 분해를 이용한 마이크로 단일추진제 추력기 개발의 초기과정으로서 선정된 촉매의 활성화, 메조스케일 반응기 제작 및 성능 평가가 이루어졌다.

여러 가지 활성 방법을 통해 적합한 촉매 활성화 조건을 찾았다. HNO_3은 활성화에는 도움이 되지만 촉매의 손실을 가져오므로 박막 촉매를 이용하는 마이크로 추력기에서 사용하기에는 어려움이 있다. $Ag(NO)_3$처리 및 $Sm(NO_3)_3$로 코팅한 경우 또한 질산은 처리 과정에서 촉매가 대부분 유실되었다. 두 가지 활성 방법의 대안으로 수행한 수소 환원법은 촉매의 손실 없이 비활성 상태의 촉매를 활성 시킬 수 있는 새로운 방법이 될 수 있음을 확인하였으며 500 ℃ 환원 온도에서 가장 좋은 활성 조건을 보였다.

메조스케일 반응기 실험결과 상온에서 시동 시 과산화수소의 완전 분해를 위해 480초 이상의 공간시간이 요구되었으며 80 ℃ 예열 시 288초까지 감소하였다. 공간시간 계산 시 입구 조건 즉, 액체 상태의 추진제 유량을 기준으로 했으므로 공간시간이 길게 나타남을 고려하더라도 위의 시간은 추력기에 사용하기에 긴 것으로 판단된다. 이를 감소시키기 위해 보다 향상된 반응성이 요구되며 코팅된 촉매의 면적을 증가시키는 연구가 필요하다. 따라서 프로토 타입의 마이크로 단일추진제 추력기 개발에 있어 한정된 반응기 공간에서 촉매의 표면적을 최대로 하는 것이 중요 설계 파라미터가 된다. 촉매를 적절한 온도로 예열하는 것은 추력기의 중요 작동 파라미터가 됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. SWALES AEROSPACE, "Final Report - Nanosat Dispenser Ship Performance Feasibility," SAI-RPT-284, 1999
2. Jongkwang Lee, DaeHoon 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. 문성환, 오화영, 허환일, "마이크로 콜드 가스 추력기의 선행 연구,", 한국추진공학회지, 제8권 2호, 2004, pp.54-61
5. 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
6. Chen Xupeng, Li Yong, Zhou Zhaoying, Fan Ruili, "A homogeneously catalyzed micro-chemical thruster," Sensors and Actuators A 108, 2003, pp.149-154
7. 이수림, 박주혁, 이충원, "100N급 H_2O_2 단일 추진제 로켓 엔진의 개발," 한국추진공학회 추계학술대회, 2005, pp.159-167
8. 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
9. 최원영, 권세진, "밀리미터 스케일 촉매 연소기에서의 수소-공기 예혼합 가스의 촉매 연소 특성," 한국연소학회지, 제10권 1호, 2005, pp.20-26
10. 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