

인젝터 방식 및 촉매 알갱이 크기에 따른 과산화수소 단일추진제 추력기의 응답 특성

안성용* · 박대중* · 정승미* · 권세진**

The Response Characteristics of the Hydrogen Peroxide Monopropellant Thruster as Injector and Catalyst Grain Size

Sungyong An* · Daejong Park* · Seungmi Chung* · Sejin Kwon**

ABSTRACT

The response characteristics of H₂O₂ monopropellant thrusters at a pulse mode were presented in this paper. A catalyst bed was fixed to MnO₂/Al₂O₃ to investigate the thruster design effect to response time. Three different thrusters (50 N class) having different injectors, ullage volumes, catalyst grain sizes, and reactor volumes were prepared to investigate the response characteristics. As a result, the ignition delay, pressure rising and tail-off time of case 2-2 thruster with 16-20 mesh catalyst size were 14, 108, 94 ms respectively, which were comparable to requirement of response time at commercial hydrazine thrusters.

초 록

과산화수소 단일추진제 추력기의 응답성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 촉매베드의 특성을 배제하고 추력기 설계 인자에 따른 응답특성을 살펴보기 위해 MnO₂/Al₂O₃를 주 촉매로 고정하였다. 세 가지 50 N 급 추력기를 이용하여 인젝터 방식, ullage volume, 촉매 펠렛 크기, 반응기 부피에 따른 응답 속도를 측정하였다. 측정 결과 16-20 mesh 크기 촉매, shower head 인젝터를 사용한 경우 점화 지연, 압력 상승 및 하강시간은 각각 14, 108, 94 ms로 상용 하이드라진 추력기 응답성에 근접한 특성을 보였다.

Key Words: Monopropellant(단일추진제), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Thruster(추력기), Catalyst(촉매), Manganese Oxide(산화망간), Response Time(응답시간)

† 2008년 8월 22일 접수 ~ 2008년 12월 17일 심사완료

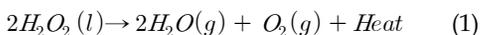
* 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

** 종신회원, 한국과학기술원 항공우주공학과
연락처, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

항공기, 인공위성 및 발사체 상단 RCS(Reaction Control System)용 단일추진제 및 다양한 탄도 미사일의 가스발생기용 단일추진제로써 널리 사용되었다. 이후 과산화수소는 하이드라진용 Shell 405 촉매대의 개발과 함께 비추력이 20-30% 높은 하이드라진으로 대체되었다. 최근 친환경적인 측면이 부각되면서 독성이 강한 하이드라진을 대체하기 위한 추진제 관련 연구가 진행되고 있는데 고농도 과산화수소는 과거 비행 이력, 독성 문제, 추진제의 특성 등을 살펴볼 때, 잠재력이 높은 추진제이다[1, 2]. 친환경 추진제를 사용하게 되면서 대규모 추진제 처리 설비가 요구되지 않아 규모가 큰 연구소 또는 회사에서만 가능했던 추력기 개발을 대학과 같은 소규모 연구실에서도 가능하게 되었다.

단일추진제 추력기 개발에서 가장 우선적으로 필요한 기술은 촉매 담지 기술이다. 일반적으로 촉매베드는 넓은 표면적을 가지는 지지체에 활성물질을 코팅시키는 방법으로 제작하는데, 이에 관련된 기술은 대부분 비공개이므로 자체적으로 수많은 시간과 노력을 통해 축적해 나가는 것으로 알려져 있다.

촉매 담지 기술이 확립된 후 추력기 설계에서는 촉매 반응기 사이징을 가장 먼저 고려해야 한다. 촉매 반응기는 추진제를 Eq. 1과 같이 분해시켜 고온 가스를 생성시킨다. 반응기를 작게 설계 할 경우 추진제를 완전히 분해시키지 못해 설계 추력을 낼 수 없다. 반대로 과도한 크기로 설계하면, 추력기의 부피와 무게가 증가하여 차후 시스템 적용 시 단점으로 작용한다. 따라서 촉매 반응기 사이징을 위해서는 제작한 촉매의 성능한계를 정확히 파악한 후 사이징 절차를 확립해야 하는데, 이에 실험적 방법을 통해 안 등은[3-5] 촉매 반응기 사이징 절차에 관한 연구를 실험적으로 수행하였다.



촉매 반응기의 사이징은 추력기 연속작동 모드에서 설계 추진제 유량을 완전히 분해시키기

위한 것으로써 정상상태에서 설계 추력을 발생시키기 위한 것이다. 추력기는 펄스 및 연속작동 모드로 운용되는데, 자세제어 추력기의 경우 임무 특성상 펄스작동으로 운용되는 경우가 대부분이다. 따라서 촉매베드, 촉매 반응기 사이징이 확립된 단계에서는 현실적인 추력기 설계 및 운용을 위해 펄스 응답 특성이 주요 관심사가 된다. 추진제 밸브의 특성을 제외시킨다면, 펄스 응답 특성은 촉매의 활성과 추력기의 설계 특성에 의해 일차적으로 좌우된다. 이에 안 등은[6] 두 가지 특성 중 촉매의 활성에 따른 특성을 살펴보기 위해 추력기를 고정시킨 후 활성물질(Pt, Ir, MnO₂)의 변화에 따른 응답 특성을 연구하였다. 또한 Dezhu Xu 등은[7] 다양한 촉매를 통해 추진제 분해 시 생성되는 가스량을 측정하는 방법으로 어떤 촉매가 응답 특성에서 유리한지 제시하였다. Hanjing Tian 등은[8] MnO₂에 PbO를 추가하여 추력기 응답성 향상을 보고하였고, M. K. El-Aiashy 등은[9] MnO₂에 ZnO를 첨가할 경우 촉매 활성이 증가됨을 보고하였다. 또한 Muhammad A. Hasan 등은[10] Ni, Cu, Bi, Ce 등의 증진제(promotor)를 MnO₂에 추가함으로써 활성이 향상되는 정도를 보고한 바 있다.

현재까지 촉매베드의 개선 방법으로 추력기 응답 특성을 향상시키는 연구가 다양하게 수행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 촉매 자체에 국한되어 있었다. 또한, 촉매의 활성평가를 추력기를 이용하지 않았고 낮은 농도의 과산화수소를 대기압에서 반응시켜 생성되는 가스량을 측정하는 방법으로 평가하여 실제 추력기 응답성 연구와는 거리가 있었다. 뿐만 아니라 추력기의 응답성은 촉매베드 뿐만 아니라 추력기 설계변수에 의해서도 실제 좌우되는데, 이에 따른 응답성 연구 사례는 찾아볼 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 추력기 설계 변수가 펄스 응답 특성에 미치는 영향을 보기 위한 실험을 수행하였다. 응답성은 촉매대 설계성 연구와 설계 변수성 운용 조건 등 매우 다양한 요소에 의해 영향을 받게 것으로 예상되는데, 본 연구에서는 단일추진제 연구와 설계에서 인젝터 방식성 반응기 크기, 촉

매 알갱이 크기 결정이 우선적인 고려사항임을 감안하여 이들 요소가 응답성에 얼마나 민감하게 영향을 주는지 고찰하였다. 다른 영향은 배제하기 위해 촉매는 $\text{MnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (34.9 wt%), 추진제는 90 wt% H_2O_2 로 고정시킨 후 응답특성을 살펴보았다.

2. 촉매 담지

지지체는 직경 1/8" 크기의 Alfa-Aesar사의 255 m^2/g 비표면적을 가지는 감마 알루미늄 펠렛을 이용하였다. 1/8" 크기를 그대로 사용할 경우 반응물의 확산저항(diffusion resistance)이 있어 펠렛 내부를 효과적으로 사용할 수 없다. 따라서 1/8" 크기 외에 16-20 mesh(직경 850 ~ 1180 μm) 크기로 지지체를 가공하여 촉매베드를 추가 제작하였다(Fig. 1). 활성물질을 포함하고 있는 전구체(precursor)는 Aldrich사의 과망간산 나트륨을, 용매는 물을 사용하였다.

촉매 담지는 함침법 중에서 단순 침적법을 변형하는 방법으로 제작하였다. 지지체 전처리 후, 전구체 용액을 24 시간에 걸쳐 흡수시켰다. 상온 및 대류 오븐에서 건조 후 하소(calcination)하였다. 과산화수소의 분해 반응에 부정적인 영향을 미치는 Na^+ 이온을 제거하고, 추가 하소를 통해 34.9 wt%의 활성물질이 코팅된 $\text{MnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 최종적으로 완성하였다(Fig. 2).

3. 추력기 형상

펠스 응답 속도 측정을 위해 50 N 급 모델 추력기를 준비하였다. 설계 단면 형상을 Fig. 3, Fig. 4에서 제시하였으며 인젝터 방식 및 반응기 크기를 Table 1에서 정리하였다. 추력기는 인젝터의 방식에 따라 Case 1과 Case 2-1 및 2-2로 구분된다. Case 1은 추진제의 균일한 분무를 위해 스프레이 시스템사의 상용 스프레이 팁을 사용하였다(Fig. 5). 사용한 인젝터 팁은 직경 1.2

mm 단일 노즐을 지니며, 내부에 스월(swirl) 장치가 부착되어 있다. Shower head 인젝터에 비해 균일한 분무가 가능하지만 분사각(50°)을 가지므로 추진제를 촉매베드 전면에서 고루 분무되도록 인젝터와 촉매 사이에 일정 거리를 띄워 설계하였다. 반응기는 직경 3 cm, 길이 4 cm이며 23 wt% $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 사용할 경우 50 N (vacuum) 추진제 유량에서 98% 특성속도 효율로 검증되었다[11].

Case 2-1은 shower head 인젝터 방식으로 직경 300 μm 오리피스를 19개 가공하였다(Fig. 5). 스프레이 인젝터와 같은 균일한 분무는 불가능하지만 인젝터와 촉매베드 사이에 공간(ullage volume)이 필요 없어 전체적으로 짧은 형상을 가진다. 촉매 반응기 형상은 Case 1과 동일하다. 인젝터 전·후에서 같은 차압이 가해질 때, 동일한 추진제 유량이 분무되도록 Eq. 2에서 $C_d \cdot A$ 값을 Case 1의 인젝터와 동일한 값을 가지도록 설계하였다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (2)$$



Fig. 1 Alumina pellet samples (1/8", 16-20 mesh)



Fig. 2 $\text{MnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ samples (1/8", 16-20 mesh)

Case 2-2는 Case 2-1의 개량형으로 반응기 길이를 제외하고는 모든 항목이 동일하다. 활성이 높은 촉매를 사용할 경우 같은 유량을 분해시킬 때 요구되는 반응기 길이가 짧아지게 되므로 고성능 촉매용으로 설계된 반응기이다. 촉매베드 하류의 반응 챔버 부피 및 노즐 형상은 세 추력기 모두 동일하다. 인젝터 전·후 압력(P2, P3), 반응챔버 압력(P4) 및 온도(T)를 측정할 수 있도록 각 위치에 센서를 장착하였다(Fig. 6).

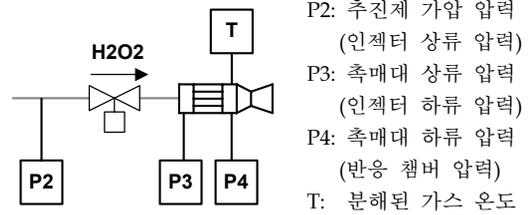


Fig. 6 Pressure and temperature sensor position

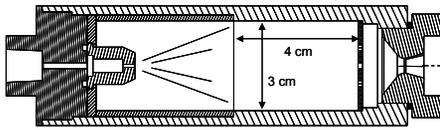


Fig. 3 Case 1 thruster

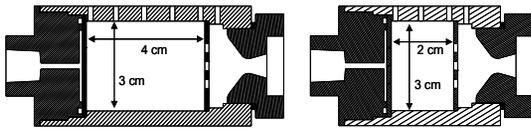


Fig. 4 Case 2-1 and Case 2-2 thruster

Table 1. Model thrusters

Thruster	Injector type (Orifice number)	Reactor size [cm]
Case 1	Spray (1)	3 (d) × 4 (l)
Case 2-1	Shower head (19)	3 (d) × 4 (l)
Case 2-2	Shower head (19)	3 (d) × 2 (l)



Fig. 5 Spray injector and shower head injector

4. 추력기를 이용한 응답성 측정

4.1 응답 속도 정의

상용 단일추진제 추력기를 포함하는 액체 추력기에서는 응답 속도를 점화지연(ignition delay, 밸브 개방 신호부터 정상상태 반응챔버압력의 1% 도달시간), 압력 상승시간(pressure rising time, 정상상태 압력이 1%에서 90%까지 상승하는데 걸린 시간), 압력 하강시간(pressure tail-off time, 밸브 close 신호로부터 정상상태 압력의 10% 까지 도달하는데 걸린 시간)으로 나누어 분류하고 있다(일부 추력기에서는 점화지연과 압력 상승시간을 같이 묶어서 표기하기도 함). 본 연구에서도 이 정의를 따라 응답 시간을 측정하였다.

4.2 응답 특성 측정 방법

실험에서 고성능 솔레노이드 밸브의 부재로 공압 밸브(Swagelok, double acting valve)를 추진제 공급 밸브로 사용하였다. 공압으로 밸브 개폐를 제어하고 공압은 솔레노이드 밸브로 제어하는 방식이다. 따라서 밸브의 정확한 개폐 시간 확인에 어려움이 있어 간접적인 방법을 이용하였다. 추진제 밸브가 닫혀 있는 상태에서 열리기 시작하는 시점에서는 가압 압력(P2)이 감소하기 시작하고, 추진제 밸브가 열려 있다가 닫히기 시작하면 가압 압력(P2)이 상승하는 특성을 이용하여 밸브의 개·폐 신호 시점으로 간주하였다.

4.3 실험방법

제작한 촉매베드를 주력기에 장착한 후 펄스 실험을 수행하였다. 냉시동(cold start) 조건에서 추진제를 30 bar로 가압하여 1.0 sec on, 1.0 sec off 펄스모드를 수행하였다. 온도 및 압력이 정상상태에 이른 후, 연속 3회의 펄스에서 응답성을 측정하여 평균하였다. 데이터 측정 및 신호 컨디셔닝은 National Instrument사의 DAQ 카드 및 SCXI 모듈(SCXI-1000, 1112, 1123 with 1 kHz filter)을 사용하였으며, Labview 8.0을 이용하여 1000 samples/sec의 샘플링 속도로 데이터를 획득하였다.

4.4 응답 특성 결과 및 고찰

응답 특성 실험은 Table 2와 같이 수행하였다. Case 1 주력기에서는 1/8" 펠렛을, Case 2-1에서는 1/8", 16-20 mesh 모두 사용하였고, Case 2-2에서는 16-20 mesh 촉매만 테스트 하였다. 경우의 수를 바탕으로 하여 1/8" 촉매에서 Case 1과 Case 2-1 경우의 주력기 변화, Case 2-1 주력기에서 1/8", 16-20 mesh의 촉매 알갱이 크기 변화, 16-20 mesh에서 Case 2-1과 Case 2-2 주력기 변화에서 응답 특성을 비교/고찰하였다.

Figure 7에서 실험 시작 후 펄스 작동 예시이다. Case 2-2 주력기에서 16-20 mesh 촉매를 사용한 경우 추진제 가압압력(P2), 촉매 상류 압력(P3), 반응챔버 압력(P4) 및 온도(T)를 도시하였다. 반응이 시작되면서 온도 및 압력이 급격히 상승하여 초기 1회의 펄스 이후에는 챔버 압력과 온도가 정상상태에 도달하였다. 정상상태에 도달 한 후 개별 펄스 형상은 Fig. 8에서 제시하였다.

Table 2. Test cases

Thruster & Catalyst size	Case 1	Case 2-1	Case 2-2
1/8"	○	○	×
16-20 mesh	×	○	○

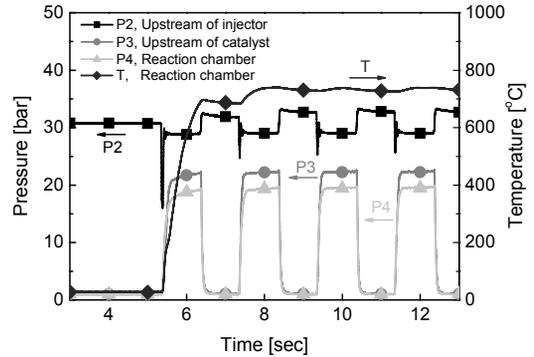


Fig. 7 Transient region (Case 2-2, 16-20 mesh)

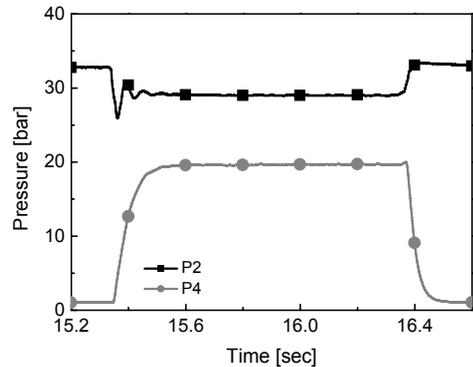


Fig. 8 One pulse (Case 2-2, 16-20 mesh)

Table 3. The response time of each test [ms]

Thruster	Grain size	A	B	D
Case 1	1/8"	32(4)	192(44)	325(23)
Case 2-1	1/8"	26(1)	119(13)	216(2)
Case 2-1	16-20 mesh	12(2)	114(1)	106(2)
Case 2-2	16-20 mesh	14(2)	108(5)	94(5)

A: ignition delay, valve open signal ~ 1% of Pc
 B: rising time, 1% ~ 90% of Pc
 D: tail-off time, valve off signal ~ 10% of Pc
 (): Standard deviation

각 경우에 따른 응답성 결과는 Table 3에서 제시하였으며 각 경우에 대한 고찰은 다음과 같다.

4.4.1 추력기 ullage volume에 따른 응답 특성

Case 1에서 펄스 실험을 수행한 후 Case 2-1의 추력기에서의 결과와 비교하였다. Case 1의 경우 응답 특성은 각각 32, 192, 325 ms, Case 2-1에서는 26, 119, 216 ms로 나타나 세 가지 응답성 항목에서 모두 큰 차이를 보였다. Case 1은 스프레이 확산각이 존재하여 촉매베드와 일정 거리를 띄워야 하므로 분무 특성은 우수하지만 ullage volume이 필수적으로 발생하게 된다. 따라서 추진제가 인젝터에서 분무된 후 일정거리만큼 떨어져 있는 촉매베드와 만난 후 반응이 시작되므로 점화 지연 시간이 증가하였다. 압력 상승 시간 및 하강 시간 항목 또한 빈 공간을 압력으로 채우는데 시간이 추가적으로 소요되므로 전반적인 응답 특성이 느려지는 경향을 보였다.

4.4.2 촉매 알갱이 크기에 따른 응답 특성

펠렛 크기에 따른 차이를 살펴보기 위해 1/8" 크기의 촉매와 16-20 mesh 크기의 촉매를 Case 2-1 추력기를 이용하여 응답 특성을 측정하였다. 16-20 mesh로 크기를 줄인 경우 응답 특성은 각각 12, 114, 106 ms로 응답 속도에 향상이 있는 것으로 나타났다.

이는 알갱이 크기 감소에 따른 반응물이 펠렛 내부로 들어가는 확산 저항의 감소 및 활성물질의 유효면적 증가를 주원인으로 볼 수 있다. 펠렛 촉매의 사이즈가 큰 경우에는 확산 저항이 존재한다[12]. 특히, 반응기 내부는 추진제 분해시 생성되는 열로 인해 고온 영역에 도달하게 되어 확산이 전체 반응속도를 조절하게 된다[13]. 따라서 펠렛 크기가 큰 경우 추진제가 펠렛 내부 세공까지 침투하지 못하고 주로 표면에서만 반응이 일어나게 되므로 겉보기 활성도가 낮다. 즉, 펠렛 사이즈를 줄일 경우 활성물질은 같은 활성을 가짐에도 불구하고 확산 저항 감소

로 인해 펠렛의 유효 표면적이 증가하므로 반응기 전체에서 보면 보다 높은 활성을 가지는 것으로 나타나게 된다. 추가적으로 작은 알갱이를 사용할 경우 큰 알갱이 보다 조밀하게 쌓이게 되어 촉매 반응기 내부의 ullage volume이 감소되는 효과 또한 존재하여 응답성에 기여하는 것으로 판단된다.

4.4.3 반응기 부피 감소에 따른 응답 특성

펠렛 크기를 줄이게 되면 활성물질의 유효 표면적이 증가하게 되므로 반응이 보다 활발하게 일어나게 된다. 따라서 같은 유량의 추진제를 분해시킨다고 할 때, 반응기 길이가 보다 짧아도 추진제를 완전히 분해시킬 수 있으므로 보다 작은 반응기를 설계할 수 있게 된다. 따라서 16-20 mesh 크기의 촉매를 사용할 경우 Case 2-1 보다 반응기 길이가 짧은 Case 2-2에서 같은 유량의 추진제를 충분히 분해시킬 수 있다. 반응기 부피 감소에 따른 영향을 살펴보기 위해 Case 2-1과 Case 2-2 추력기를 이용하여 응답 특성의 변화를 살펴보았다.

Case 2-1에서는 응답 속도가 12, 114, 106 ms 임에 비해 Case 2-2에서는 14, 108, 94 ms로 앞서 수행한 두 가지 비교 항목에 비해 정도는 미미하였지만 점화지연을 제외한 항목에서 수 ms 정도의 향상이 있음이 나타났다. 이는 Case 2-2가 Case 2-1 보다 촉매 반응기 부피 대비 주입되는 추진제 유량이 크고, 반응기가 작아져서 촉매 알갱이 사이의 ullage volume이 소폭 감소하는 효과가 있었기 때문으로 판단된다. 세 가지 응답 특성 요소에서 수 ms 내의 차이를 보여 반응기 부피 변화에 따른 응답 특성은 큰 개선이 보이지 않았으나 반응기 부피 및 무게 감소는 전체 시스템 통합 관점에서 볼 때 매우 바람직할 것이다.

응답 특성 결과 네 가지 실험 중 Case 2-2 추력기에서 16-20 mesh 크기의 촉매를 사용한 경우 응답 속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 측정된 응답 속도를 상용 추력기와 비교하기 위해 자료조사를 통해 얻은 하이드라진 추력기의 응답성 또는 응답성 요구조건을 Table 4에서 제시

하였다. 수치비교 결과 Case 2-2 추력기의 응답 속도는 상용 하이드라진 추력기의 응답속도 요구조건을 만족하는 수준으로 나타났다.

Table 4. Requirements of commercial hydrazine thrusters [14, 15] (unit : ms)

Company	Thruster	Thrust	A	B	D
TRW	MRE-1	1 lbf	80	-	-
RAFAEL	ACT-45	45 N	100	200	
	MR-103	0.19-1.12 N	150	-	
	MR-104	205-572 N	50	-	
Aerojet	MR-106	8.9-26.7 N	200	-	
	MR-107	51.2-257.9 N	200	-	
	MR-50	9.79-38.7 N	150	-	
	MR-111	0.44-5.34 N	150	-	

A: ignition delay, valve open signal ~ 1% of Pc
 B: rising time, 1 % ~ 90 % of Pc
 D: tail-off time, valve off signal ~ 10 % of Pc

5. 결 론

단일추진제 추력기의 응답 속도에 미치는 다양한 파라미터 중 중요성을 고려하여 인젝터 방식, 촉매 알갱이 크기 및 촉매 반응기 부피가 세 가지 응답 속도에 항목에 미치는 영향을 살펴보았다.

스웰 타입의 스프레이 인젝터를 이용할 경우 추진제 분무 특성 향상은 기대할 수 있으나 불필요한 ullage volume 증가로 펄스 응답 속도가 느려지는 경향을 보였다. 따라서 스프레이 인젝터는 반응기 자체 성능평가용 또는 연속작동으로만 작동하는 추력기에서는 적합하지만, 펄스 작동에서는 shower head 인젝터에 비해 불리한 특성을 나타내었다. 향후 개발되는 자세 제어용 추력기는 shower head 방식의 인젝터가 스프레이 분무 방식보다 응답성 면에서 유리하다.

펄스 응답 측정 결과 추력기 내부의 ullage

volume이 응답성 향상에 직접적인 관련이 있음을 확인하였으며, 촉매베드 알갱이 크기 감소에 따른 활성증가 또한 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 촉매 알갱이 크기를 줄일 경우 응답성 개선 외에 추력기 부피 및 무게 감소 효과를 얻을 수 있어 긍정적인 영향을 주었다.

최종적으로 Case 2-2 추력기는 응답 속도가 14(A), 108(B), 94(D) ms로 상용 하이드라진 추력기의 응답 속도 요구조건과 유사한 특성을 보였다. 본 연구는 촉매특성을 배제하기 위해 모든 실험을 망간 계열 촉매로 고정시켰다. 따라서 망간 계열보다 활성이 높은 귀금속 촉매를 이용하거나, 망간 촉매에 증진제를 첨가하여 활성을 증가시킬 경우 보다 빠른 응답 특성이 기대된다. 또한 현재 추력기는 빠른 응답을 가지는 밸브의 부재 및 추력기 설계 최적화 작업이 완료되지 않은 단계임 고려할 때 응답 속도 개선여지가 많고 선진국의 전용물로 알려진 고추력 추력기의 국내 개발 가능성은 밝을 것으로 판단된다.

일련의 실험 결과 및 경험은 향후 필요로 하는 다양한 추력 레벨의 추력기 설계에 반영하여 보다 빠른 응답성을 가지는 고성능 추력기 개발을 지속적으로 도모할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Ventura, G. Garboden, "A Brief History of Concentrated Hydrogen Peroxide Uses," 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 1999-2739
2. 임하영, 안성용, 권세진, "친환경추진제 "과

- 산화수소"의 특성과 응용," 한국추진공학회 춘계학술대회, 2006, pp.283-287
3. 안성용, 권세진, "액체추력기 촉매베드 크기 결정을 위한 실험적 방법," 한국추진공학회지, 제12권, 제3호, 2008, pp.24-33
 4. 안성용, 권세진, "50 Newton 급 액체 추력기의 촉매 베드 사이징," 제30회 한국추진공학회 춘계학술대회, 인하대학교, 2008, pp.145-148
 5. Sungyong An, Sejin Kwon, "Catalyst Bed Sizing of 50 Newton Hydrogen Peroxide Monopropellant Thruster," 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA2008-5109, Hartford, USA, 2008
 6. 안성용, 권세진, "활성물질에 따른 고농도 과산화수소의 분해특성," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.26-34
 7. Dezhu Xu, Huanghe Yang, Xiunan Zhou, Tao Li, Jing Cong and Tao Zhang, "An investigation in the catalytic decomposition of hydrogen peroxide for gas generation," 5th International Hydrogen Peroxide Propulsion Conference, West Lafayette, USA, 2002
 8. Hanjing Tian, Tao Zhang, Xiaoting Sun, Dongbai and Liwu Lin, "A novel mixed metal oxide catalyst for the decomposition of hydrogen peroxide," 2nd International Hydrogen Peroxide Propulsion Conference, Purdue University, 1999, pp.199-208
 9. M. K. El-Aiashy, H. S. Mazhar, S. M. Kamal, "Solid-solid interaction between manganese carbonate and zinc carbonate and the decomposition of H₂O₂ over mixed zinc-manganese oxide catalysts," Materials Letters 24, 1995, pp.97-101
 10. Muhammad A. Hasan, Mohamed I. Zaki, Lata Pasupulety, Kamlesh Kumari, "Promotion of the hydrogen peroxide decomposition activity of manganese oxide catalysts," Applied Catalysis A: General 181, 1999, pp.171-179
 11. Sungyong An, Sejin Kwon, "Catalyst Reactor Bed of Hydrogen Peroxide Decomposition for Upper Stage Motion Control," Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2008, Gyeongju, Korea, 2008
 12. Massimo Morbidelli, Asterios Gavriilidis, and Arvind Varma, Catalyst Design - Optimal Distribution of Catalyst in Pellets, Reactors, and Membranes, Cambridge University Press, 2001
 13. 전학제, 서곤, 촉매개론, 제4판, 한림원, 2002.
 14. 이균호, 유명중, 김수겸, 장기원, 조성준, "단일추진제용 이리듐 촉매의 연소성능 측정 및 국내개발 현황," 한국추진학회지, 제10권, 제3호, 2006, pp.109-117
 15. <http://www.astronautix.com>