

소형 추력기 반응기 설계에 대한 실험적 고찰

이정섭* · 김수겸** · 유명종** · 권세진†

Experimental Analysis of Small Thruster Chamber Design

Jeongsub Lee* · Kim Su-Kyum** · Yu Myoung-Jong** · Sejin Kwon*†

ABSTRACT

The parameters which can affect the performance of small thruster were verified by experiments. The loss of catalyst through the port for pressure sensor was prevented by chamber wall mesh. There was no performance decrease due to chamber wall mesh, and stable supply of propellant is the key of stability of the thruster. However, sudden pressure drop in the chamber can decrease the performance instantly. Therefore, the sudden pressure drop should be eliminated as much as possible. The cross type distributor showed more stable performance than circular type, and structural strength is also stronger.

초 록

소형 추력기의 반응기 설계에 영향을 주는 인자를 실험을 통해 확인하였다. 소형 추력기의 경우 압력 센서 포트를 통한 촉매의 유실이 발생할 수 있으므로 벽면 메쉬를 삽입하여 유실을 방지하였다. 실험결과 메쉬에 의한 성능 저하는 없었으며, 안정적인 질량유량의 공급이 추력기의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 반응기에서 급격한 압력저하가 발생할 경우 이는 바로 성능에 반영되므로 이러한 압력 저하를 최소화해야 안정적인 성능을 확보할 수 있다. 반응기 후단의 디스트리뷰터는 원형과 십자형 중 보다 안정적인 성능을 보이면서 구조적으로 견고한 십자형이 더 적합한 것으로 실험 결과 나타났다.

Key Words: Reactor design(반응기 설계), chamber wall mesh(반응기 벽면 메쉬), cross distributor (십자형 디스트리뷰터)

1. 서 론

소형 위성의 기동력을 부여하기 위해서 기존

추력기보다 작은 추력을 갖는 추력기가 요구된다. 추력기는 단일 추진제의 촉매 분해 반응으로부터 발생한 고온 고압의 가스를 분출하여 추력을 얻는 원리로서, 반응기에서의 완벽한 분해가 추력기의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 완벽한 분해 반응을 보장하면서 크기를 최소화할 수 있도록 반응기 설계를 최적화하여야 한다. 또한

* KAIST 항공우주공학과

** 한국항공우주연구원

† 교신저자, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

반응기 내부에서 발생할 수 있는 각종 불안정성 요소의 영향을 최소화하여 작동 중 안정적인 성능을 발휘할 수 있도록 하여야 한다.

소형 추력기의 성능 검증을 위해 작동 실험을 한 뒤 반응기 내부의 온도와 압력을 측정하여 이를 토대로 성능 평가를 실시할 수 있다.

2. 추력기의 설계

친환경 추진제로 널리 알려진 과산화수소를 추진제로 하는 1 N 급 추력기의 설계를 수행하였다. 1 N 급 추력기의 유량을 제어하기 위해 직경 250 μm 오리피스를 갖는 인젝터를 제작하였다. 이 때 반응기의 압력 안정성을 위해 인젝터에서 반응기 압력의 15 ~ 25%의 압력강하가 일어나도록 설계하여야 한다. 반응기 압력은 10 bar로 설정하였다.

반응기의 형상은 원통형으로서 직경과 길이에 따라 같은 반응기 부피를 갖더라도 추력기의 특성 길이가 달라진다. 일반적인 특성 길이는 0.8 ~ 3 m 이지만 단일 추진제 추력기의 경우는 이보다 더 큰 값을 갖기도 한다[1]. 특성 길이와 반응기의 직경 및 길이는 다음 Eq. 1과 같은 관계를 갖는다.

$$L^* \propto (D_c^2 \cdot L) \quad \text{Eq. 1}$$

위 식에서와 같이 반응기의 직경을 키우는 방법이 더 큰 특성 길이 값을 갖게 할 수 있다. 그러나 인젝터의 오리피스가 매우 작고, 단일 오리피스이기 때문에 반응기의 반경이 클 경우 인젝터를 통해서 분사되는 추진제가 효과적으로 분산되지 못 할 우려가 있다. 추력기의 길이가 길어지게 될 경우 촉매에서의 압력 강하가 커지게 되는 단점이 있다. 이를 고려하여 직경 9 mm에 길이 12 mm인 반응기를 설계하였고, 이때 특성 길이는 1.34 m로 비교적 작은 값을 갖고 있다.

추력기 노즐의 설계는 지상 시험에 맞게 외부 압력을 대기압으로 정한 뒤 확산부의 면적비를 계산하였다. 계산 결과 노즐 목 직경은 1.00

mm, 면적비는 약 2.13이다. Figure 1은 제작된 1 N 급 추력기의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 1 1 N class monopropellant thruster

3. 질량 유량과 반응기 압력의 영향

추력기의 성능 평가를 위한 척도로 가장 널리 사용되는 것은 특성속도로서 다음 Eq. 2를 통해 계산이 가능하다.

$$C^* = \frac{P_{cham} A_t}{\dot{m}} \quad \text{Eq. 2}$$

위 식에서 추진제의 질량 유량과 반응기 압력은 측정된 데이터를 통해 얻을 수 있다. 이 때 반응기 압력을 측정하기 위해서 반응기 벽에 작은 구멍을 가공하여 압력센서와 연결한다. 이러한 방식을 사용할 경우 촉매의 크기가 매우 작기 때문에 압력 측정을 위한 구멍을 통해 촉매가 유실될 가능성이 매우 크다. 촉매의 유실은 크게 두 가지로 설명될 수 있다. 첫째는 추력기에 촉매를 충전하는 도중에 유실되는 것으로서, 촉매의 고른 분포를 위해 촉매 삼입 시 추력기에 가하는 진동에 의해 유실되는 것이다. 둘째는 초기 작동 내지는 작동 중 유실되는 것이다. 두 가지 방법 모두 정확히 얼마만큼의 촉매가 유실되는 지 정량적으로 알기 어려우며, 매 실험 시 유실되는 양이 달라지기 때문에 정확한 실험을 위해서 유실되는 양을 최소화해야 한다. 기존의

큰 추력기에서는 촉매의 입자 크기가 크고 반응기가 크기 때문에 이러한 유실이 잘 일어나지 않고, 그 영향 역시 미미하였다. 그러나 1 N 급 이하의 소형 추력기에서는 촉매의 크기가 작고 실험 후 확인한 결과 촉매의 유실이 확연히 확인되기 때문에 이를 방지하기 위해 반응기 벽면에 mesh를 두른 뒤 실험을 수행하였다. Figure 2는 실험 결과이며, 가압 압력을 변화시키며 실험을 수행하였다.

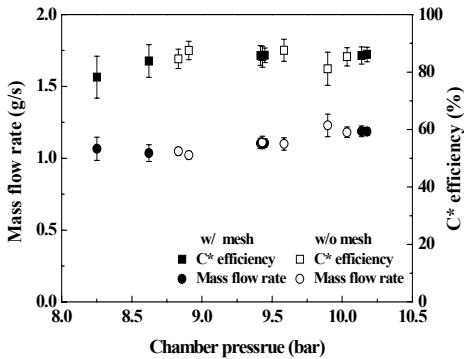


Fig. 2 C^* efficiency and mass flow rate of test results with chamber wall mesh

실험 결과 매쉬에 의한 성능 저하가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 반응기 압력이 8 bar 부근에서는 특성속도 효율의 편차가 다소 크게 나타났다. 이는 낮은 반응기 압력으로 인해 추진제 공급의 불안정성이 발생하게 되어 효율의 편차가 커진 것으로 판단된다. 설계 반응기 압력인 10 bar 부근에서 85% 이상의 특성속도 효율을 얻을 수 있었으며, 반응기 압력이 증가할수록 안정성이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

특성 속도에 영향을 미치는 것은 반응기 압력과 추진제의 질량유량이다. 먼저 반응기 압력과 질량유량의 관계는 아래 fig. 3에서 알 수 있듯이 크게 연관이 없다고 할 수 있다. Figure 3에 나타난 압력의 다운 피크들은 추진제의 공급에 전혀 영향을 주지 못하였는데, 이는 인젝터에서 압력강하가 충분하여 반응기 압력의 섭동이 영향을 미치지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 다운 피크가 나타날 때 추진제의 질량유량

을 살펴보면 두 인자 사이에 큰 개연성이 없음을 알 수 있다. 즉, 반응기에서 다른 이유로 인해 압력이 급감한 것으로 결론지을 수 있다. 이러한 원인으로는 촉매 후단부에서 제대로 분해 반응이 일어나지 않아 순간적으로 압력이 급감한 것으로 보인다. 그러나 현재 가지고 있는 실험정보만으로는 정확한 원인을 파악하기는 어렵다.

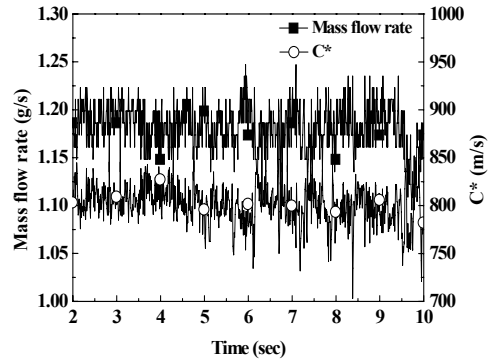


Fig. 3 Mass flow rate and C^* results

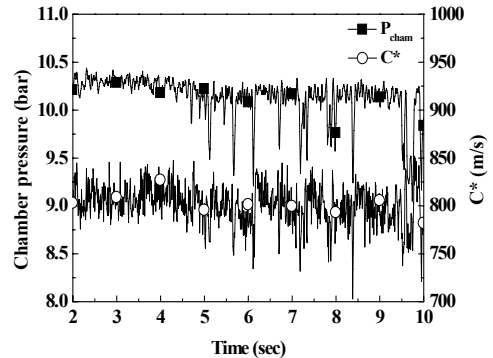


Fig. 4 Chamber pressure and C^* results

Figure 4는 추진제의 질량유량과 특성속도의 관계를 보여주고 있다. 특성속도는 질량유량에 반비례하므로 질량유량이 늘어나는 부분에서는 특성속도가 감소하는 양상을 보이고 있다. 그러나 반응기 압력이 다운 피크를 보이는 곳에서는 질량유량에 의한 영향보다 반응기 압력의 감소가 더 크게 영향을 미쳐 특성속도가 감소하게 된다. 이러한 영역에서는 질량유량이 감소하더라

도 반응기 압력의 감소가 더 우세하게 작용하여 특성속도에서도 다운 피크가 발생하게 된다. 반응기 압력과 특성속도의 다운 피크가 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 추력기의 안정적인 성능을 확보하기 위해서, 다시 말해 특성속도의 섭동을 최소화하기 위해서는 우선적으로 질량유량의 공급이 안정적으로 이루어져야 한다. 또한 반응기 압력이 급감하는 다운 피크 현상이 나타날 경우 질량유량의 안정성과 상관없이 특성속도가 떨어지므로 이와 같은 현상을 최소화 하여야 한다.

4. 디스트리뷰터 형상의 결정

반응기에 장착된 촉매가 노즐을 통해 빠져나가지 못하도록 하기 위해 반응기 후단에 별도의 장치 가 필요하다. 소형 추력기에 사용되는 촉매의 입자 크기가 작기 때문에 금속 메쉬를 사용하여 촉매의 이탈을 방지하였다. 이 때 금속 메쉬를 고정하기 위해 디스트리뷰터를 추가로 장착한다. 원형과 십자형, 두 가지 디스트리뷰터에 대하여 실험을 수행하였으며, fig 5는 실험 결과를 보여준다.

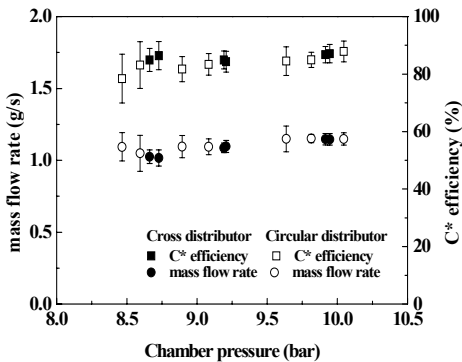


Fig. 5 Comparison of circular and cross distributors

원형 디스트리뷰터는 생성 가스의 흐름에 끼치는 영향을 최소화할 수 있고 십자형 디스트리뷰터는 메쉬를 보다 강력하게 지지할 수 있다. 두 가지 디스트리뷰터가 각기 장단점이 있기 때

문에 실험을 통해 추력기 성능에 어떠한 영향을 주는 지 파악하였으며, 실험 결과 디스트리뷰터의 형상이 성능에 두드러지게 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 반응기 압력이 낮은 경우에 있어서는 십자형 디스트리뷰터를 사용한 경우에 좀 더 안정적인 성능을 보여주고 있다. 즉, 원형 디스트리뷰터를 사용해 실험을 한 경우 반응기 압력 저하로 인한 불안정성의 저하가 더 두드러졌다고 할 수 있다. 또한 십자형 디스트리뷰터를 사용한 경우 실험 종료 후 메쉬를 확인한 결과 압력에 의한 메쉬의 변형이 더 심한 것을 확인할 수 있었다. 즉, 장시간 사용에 따른 메쉬의 변형 내지는 손상의 확률이 더 클 수 있다. 따라서 이 추력기에서는 십자형 디스트리뷰터를 사용하는 쪽이 더 유리하다고 결론지을 수 있다.

5. 결 론

1 N 급 추력기의 반응기 설계 시 필요한 인자를 실험을 통해 알아보았다. 압력을 측정하기 위한 센서 포트를 통한 촉매의 유실을 막기 위한 메쉬에 의한 성능 저하는 없었으며, 질량유량이 반응기 압력에 비해 성능에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 십자형 디스트리뷰터를 사용할 경우 안정성과 성능 모두에서 더 유리한 것으로 실험 결과 나타났다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 "학연협력강화사업"의 지원을 받았으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992