

반응기 설계인자에 따른 과산화수소 단일추진제 추력기의 응답속도 및 압력특성

안성용* · 이정섭* · 이재원** · 조승환** · 권세진***

Response/Pressure Characteristics of H₂O₂ Monopropellant Thruster with the Reactor Design

Sungyong An* · Jeongsub Lee* · Jaewon Lee** · Seunghwan Cho** · Sejin Kwon***

ABSTRACT

The response times of monopropellant thrusters at a pulse mode were investigated experimentally as design parameters and feed pressure conditions. Five different model thrusters as injection direction/uniformity, aspect ratio of reactor, volumes of manifold and chamber were designed. As a results, two parameters, aspect ratio and manifold volume, were directly related to response characteristics. Additionally, chugging instability at reaction chamber was observed when pressure drop across the catalyst bed was increased due to high aspect ratio or when low pressure was built at reaction chamber.

초 록

과산화수소 단일추진제 추력기의 설계인자에 따른 펄스 응답속도에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다. 서로 다른 다섯 개의 50 Newton 급 추력기를 이용하여 인젝터 분사 방향/균일도, 반응기 세장비, 매니폴더 및 챔버부피의 변화에 따른 응답속도를 측정하였으며, 가압압력에 따른 차이 또한 살펴 보았다. 그 결과 다른 요소에 비해 반응기 세장비 및 매니폴더 부피가 응답속도에 직접적인 관련이 있었다. 또한 반응기 직경/길이비가 증가하여 압력 손실이 크거나 반응챔버의 압력이 낮게 형성되는 경우 압력 불안정성이 나타났다.

Key Words: Monopropellant(단일추진제), Hydrogen Peroxide(과산화수소), Thruster(추력기), Response Time(응답속도)

1. 서 론

* 한국과학기술원 항공우주공학과, 박사과정
** (주) 한화 대전공장 개발부, 구미공장 개발2부
*** 한국과학기술원 항공우주공학과, 교수
연락처, E-mail: trumpet@kaist.ac.kr

친환경성이 대두되면서 과거 사용되었던 독성 또는 발암성 추진제의 대체 연구가 활발히 진행되고 있는데 과산화수소는 과거의 비행이력, 추진제의 우수한 특성 등으로 인해 항공우주 시스템에 적용 가능성이 높다. 무독성 추진제를 사용

하게 되면서 고가의 추진제 처리 및 안전 설비가 요구되지 않아 과거 대규모 연구소에서만 가능했던 추력기 개발이 소규모 대학 연구실에서도 가능하게 되었다. 이에 카이스트 로켓 연구실에서는 다년간 요구 추진제 유량을 분해시키는 단일추진제 추력기용 반응기 크기 결정[1], 추진제 분해용 다양한 촉매베드 담지[2] 등의 연구를 통해 단일추진제 추력기 설계 역량을 키워왔다.

추력기는 연속 및 펄스작동의 두 가지 모드로 운용되는데, 연속작동은 정상상태 추력 값 또는 압력 불안정성이 주요 관심사인 반면, 펄스작동은 주목적이 사용 빈도가 높은 비행체 자세제어이므로 빠른 응답특성에 초점이 맞춰진다. 즉, 연속작동에서의 설계 추력 값 및 펄스작동에서의 응답특성이 주요 지표가 된다.

펄스 응답특성에 영향을 주는 요소는 ① 촉매베드, ② 추력기 설계 및 ③ 운용조건으로 나누어 볼 수 있다. 추진제 분해 반응에 직접 참여하는 촉매베드에는 활성물질, 전구체, 지지체 특성, 활성물질 담지방법, 전/후처리조건, 촉매 결정 크기 등과 같은 다양한 요소가 있다. 과산화수소 추력기의 경우 해외의 다양한 연구 그룹에서 촉매의 활성을 증가를 통해 응답성을 향상시키려는 시도가 있었으며, 국내에서는 다양한 촉매 후보군에 따른 응답성을 살펴본 연구 사례가 있었다[1]. 이와 반대로 추력기 설계 인자가 응답성에 미치는 연구는 구체적으로 수행/보고된 사례가 드물었고 비공개 자료로 분류된 사례가 많았다. 따라서 본 연구에서는 추력기 설계 인자 및 운용압력에 따른 추력기의 응답특성을 측정하는 연구를 하였다. 촉매에 따른 특성을 배제하기 위해 한 가지 촉매만을, 추진제는 MIL-16005F에 상응하는 90wt% H₂O₂를 사용하였다.

2. 모델 추력기 및 실험방법

추력기의 설계변수에 따른 영향을 살펴보기 위하여 50N 급 추력기 5가지를 설계하였다(50N-01,02,03,04,05). 설계 변수는 인젝터 분사방향, 분사 균일도, 매니폴더 부피, 촉매대 하류의 챔버 부피, 촉매 반응기 세장비(d/l)이며 Table 1

에서 정리하였다. 촉매 반응기의 부피는 모두 동일하며, 각각의 설계 단면 형상과 제작된 부품을 Fig. 1, 2에서 제시하였다.

초기 펄스에서 발생할 수 있는 비정상적인 특성 구간을 피하기 위해 한 두 차례의 펄스를 수행한 이후부터 응답시간을 측정하였다. 밸브 개폐시간은 각각 1.0 sec로, 추진제 가압압력은 10, 20, 30, 40 bar에 대해 실험하였다.

응답시간의 정의는 일반적인 단일추진제 추력기에서 적용하는 점화지연(밸브 open signal~1% Pc), 압력상승시간(1%~90% Pc) 및 압력하강시간(밸브 close signal~10% Pc)으로 나누어 평가하였으며, 밸브 개폐 신호를 주는 시점은 가압압력(P1) 추이를 이용하여 간접적으로 포착하였다. 인젝터 전후 및 촉매대 하류에서 챔버 압력, 촉매대 내부에서 길이방향으로의 온도, 추진제 유량 신호를 수신하였으며, 데이터는 SCXI 모듈로 500 samples/s (1 kHz filter)로 측정하였다.

Table 1. Design parameters of model thrusters

Parameter	Values
Injection direction	Plate, angled, radial (0, 30, 90°)
Orifice dia.(no.) of injector	φ1.55(1), φ0.9(3), φ0.6(7) φ0.4(15), φ0.36(19)
Aspect ratio of reactor (d/l)	0.5, 1.0, 2.0
Manifold vol.	2, 4, 8 % of designed \dot{m} chamber vol.
chamber vol.	16, 32, 64% of reactor vol.

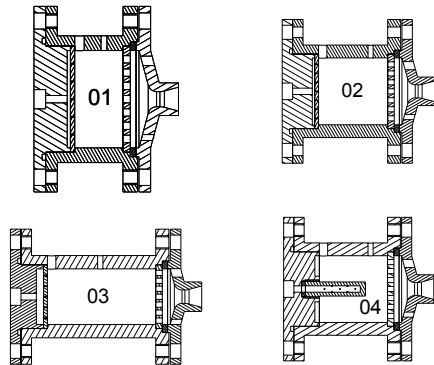


Fig. 1 Cross-sections of model thrusters

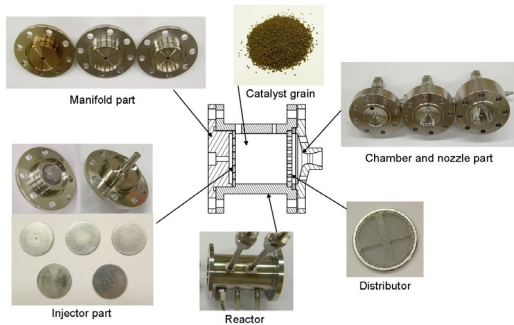


Fig. 2 Each component of thrusters

3. 응답특성 결과 및 경향성 정리

설계변수에 따른 각 추력기의 응답성을 Table 2에서 정리하였다. 전반적으로 점화지연(A) 20 ms 이내, 압력상승시간(B) 40~80 ms, 압력하강 시간(D) 70~180 ms 수준으로 나타났다.

인젝터의 영향을 살펴보면, 같은 유량대에서 인젝터 분사 방향(plate, angled, radial)에 따른 응답특성 차이는 오차범위 내로 적었다. 또한, 인젝터 오리피스 직경과 개수 변화에 따른 분사 균일도 또한 응답성에는 큰 차이가 없었다(50N-02). 다만 분사 균일도에 따라 유효한 촉매 영역에 차이가 생겨 이에 따른 온도 분포의 변화는 관찰되었다.

반응기 부피를 고정시킨 상태에서 세장비를 변화시킨 경우 반응기 형상이 길어질수록 압력 상승 및 하강시간이 조금 증가하는 경향을 보였다. 특히, 세장비가 0.5(50N-01), 1.0(50N-02)은 별다른 차이가 없었으나 2.0(50N-03)에서는 응답성이 눈에 띄게 느려지는 것을 확인하였다.

매니폴더 및 챔버 부피(촉매대 하류) 또한 응답성에 미치는 영향을 살펴보았는데(50N-02), 압력하강시간에 매니폴더 부피가 깊은 관련이 있었고 챔버 부피는 약간의 영향이 있었다.

마지막으로 가압압력을 증가시켜 초기 공급되는 유량을 증가시킨 경우 일반적인 상식으로는 응답성이 크게 향상될 것으로 판단하였으나, 실험한 10~40 bar의 압력 범위에서는 뚜렷한 경향성은 나타나지 않았고, 약간의 응답성 향상이 관찰되는 정도였다.

Table 2. Summary of test results [unit: msec]

Thruster	Condition	A	B	D
50N-01 (AR=0.5)	P:10, I15	11(3)	59(3)	97(2)
	P:20, I15	10(2)	43(1)	88(2)
	P:30, I15	12(1)	41(2)	94(1)
	P:40, I15	16(2)	53(2)	94(7)
50N-02 (AR=1.0)	P20,I1,M1,C1	6(5)	47(7)	78(14)
	P20,I3,M1,C1	9(3)	38(2)	60(10)
	P20,I7,M1,C1	9(1)	34(1)	81(5)
	P20,I15,M1,C1	6(1)	55(0)	64(2)
	P20,I19,M1,C1	8(2)	39(3)	87(11)
	P20,I15,M1,C2	4(1)	55(3)	99(51)
	P20,I15,M1,C4	8(2)	45(1)	80(6)
	P20,I15,M2,C1	10(12)	57(14)	69(9)
	P20,I15,M4,C1	15(1)	44(1)	180(22)
	P10,I15,M1,C1	4(1)	53(8)	85(4)
50N-03 (AR=2.0)	P:10, I15	19(0)	70(2)	173(10)
	P:20, I15	17(1)	99(1)	141(8)
	P:30, I15	20(1)	113(2)	146(2)
	P:40, I15	20(1)	130(1)	137(9)
50N-04 Radial (AR=1.0)	P:10, I15	14(3)	67(3)	81(1)
	P:20, I15	15(4)	47(8)	80(1)
	P:30, I15	11(3)	62(1)	80(2)
50N-05 Angled (AR=1.0)	P:40, I15	9(1)	49(1)	76(2)
	P:10, I15	9(1)	80(3)	102(2)
	P:20, I15	11(3)	48(6)	103(4)
	P:30, I15	16(1)	69(1)	97(2)
	P:40, I15	12(2)	33(1)	99(1)

A: ignition delay, B: rising time, D: decaying time

(): Standard deviation

P: feed pressure, I: injector orifice number, M: manifold volume

C: chamber volume of catalyst bed downstream

마지막으로 압력 섭동의 경향을 살펴보았다(Fig. 3). 일반적으로 소형 추력기에서 낮은 압력 범위에서 나타나는 chugging instability가 일부 경우에 나타났는데, 촉매대의 압력강하 값이 인젝터에서의 압력강하보다 큰 경우에, 또는 가압압력을 낮게 설정하여 반응챔버의 압력이 설계 압력보다 현저히 낮게 형성시킨 경우 chugging instability가 나타났다.

4. 결론

과산화수소 단일추진제 추력기의 다양한 설계 인자, 운용 압력조건에 따른 펄스 응답특성을 고찰하였다. 측정된 응답특성은 Rafael 또는 Aerojet 사의 상용 하이드라진 추력기의 펄스 응

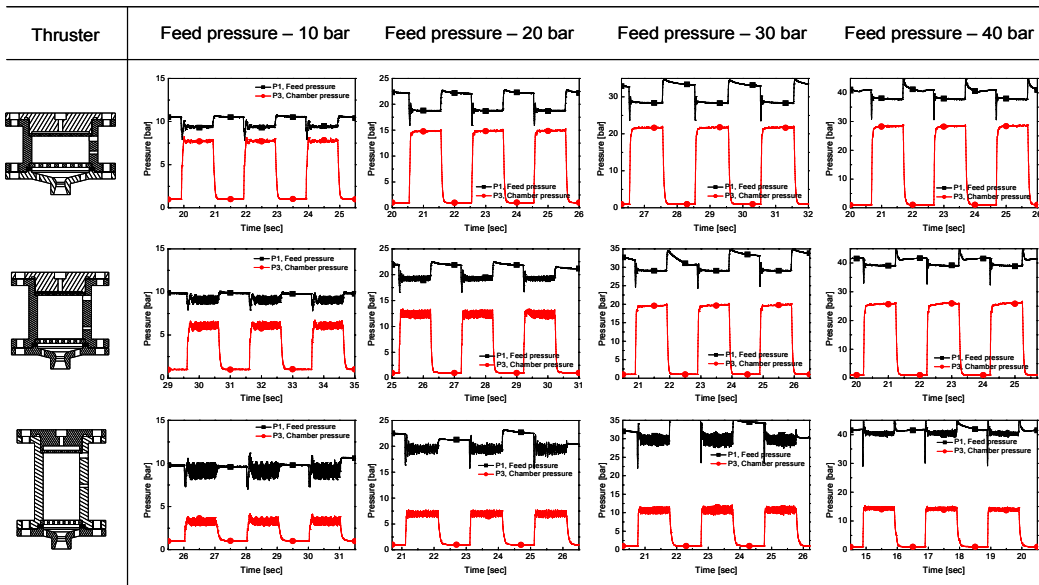


Fig. 3 Chamber pressure fluctuation of each test case.

답 요구조건을 만족하는 수준이다(Table 3).

빠른 응답성을 가지는 추력기 설계를 위해서는 반응기의 세장비가 일정 이하가 되는 것이 바람직하였다. 촉매대 하류의 챔버 부피보다는 인젝터 상류의 매니폴더 부피가 응답성에 밀접한 관계가 있었다. 또한 인젝터에서 압력강하가 고정된 상태에서 불안정성을 피하기 위해서는 촉매대에서의 압력 강하를 적게 설계하거나 반응챔버에서 형성되는 압력을 고압으로 운용하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

상기 제시한 응답성 결과는 추력기 설계 인자에 따른 특성만을 살펴본 것이며, 뚜렷하게 경향성이 나타나지 않는 경우 또한 있었다. 이는 실제 영향이 없을 가능성도 있으나, 실험 범위 선정이 적절하지 않았을 가능성 또한 배제할 수는 없을 것이다. 또한 추력기 설계 인자이외에 촉매대의 특성, 추력 수준 및 기타 운용 환경 등에 따라서 응답속도 또는 경향성에 차이가 있는지에 대한 지속적인 연구가 요구되며, 이런 일련의 연구는 다양한 추력 수준을 가지는 단일추진제 추력기의 국내 설계 역량을 한 단계 올려놓을 수 있을 것으로 기대된다.

Table 3. Requirements of commercial hydrazine thrusters (unit : msec)

Company	Thruster	Thrust	A+B	D
RAFAEL	ACT-45	45 N	100	200
	MR-103	0.19-1.12 N	150	-
Aerojet	MR-111	0.44-5.34 N	150	-
	MR-107	51.2-257.9 N	200	-

후 기

본 연구는 (주)한화의 과산화수소 단일추진제 추력기 위탁과제의 지원을 받아 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 안성용, 권세진, “액체추력기 촉매베드 크기 결정을 위한 실험적 방법,” 한국추진공학회지, 제 12권, 제 3호, 2008, pp.24-33
2. 과산화수소 단일추진제 추력기 개발 및 성능 검증(2008), 과제보고서, 한국항공우주연구원.
3. 안성용, 권세진, “활성물질에 따른 과산화수소 추력기의 응답 특성,” 한국추진공학회지, 제 12권, 제 5호, 2008, pp.26-33