

상압 환경에서 산화제 과잉 예연소기용 인젝터의 분무특성 연구

소윤석* · 양준호* · 최성만*

Spray Characteristics of the Oxidizer-rich Preburner Injector in Ambient Pressure Environment

Younseok So* · Joonho Yang* · Seongman Choi*

ABSTRACT

The spray characteristics of the oxidizer-rich preburner are investigated. From the PDPA measurement, droplet SMD of 210 μm and droplet axial velocity of 38 m/s are measured at 100 mm distance from the nozzle tip on the fuel pressure of 25 kgf/cm^2 and oxidizer pressure of 10 kgf/cm^2 . The droplet velocity is decreased with the axial distance and the oxidizer spray makes dominant effect on the combined spray characteristics of the oxidizer-rich preburner injector.

초 록

산화제 과잉 예연소기용 인젝터의 분무특성을 연구하였다. PDPA 측정은 인젝터의 압력 조건이 연료 25 kgf/cm^2 와 산화제 10 kgf/cm^2 일 때 수행하였다. 노즐 끝단으로부터 100 mm일 때 액적크기는 210 μm 이며, 액적 속도는 38 m/s로 측정되었으며, 액적 속도는 노즐 끝단에서 멀어질수록 감소였다. 산화제 분무가 산화제과잉 분사기의 혼합특성을 지배하는 주된 인자임을 확인하였다.

Key Words: Oxidizer-rich Preburner(산화제 과잉 예연소기), Swirl Injector(스월 인젝터), Ambient Pressure Spray Characteristics(상압 분무 특성)

1. 서 론

우리나라는 액체추진 로켓인 KSR-III를 2002년에 발사 성공하였으며, 100kg급 소형위성 발사체인 KSLV-I 및 1,500kg급 실용위성 발사체인 KSLV-II를 2015년까지 자력으로 발사에 정으로

있다. 따라서 향후 개발될 발사체는 고성능, 고추력을 요구하게 됨으로써, 가스발생기를 사용한 open 사이클 엔진에서 한 단계 발전된 산화제 과잉 예연소기를 사용한 closed 사이클 엔진 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다[1].

그러나 액체로켓에서 고효율을 추구하는 과정에서 연소 불안정 현상이 유발되는 것으로 알려져 있다. 이 때문에 고효율이며 안정적인 추진제 분사시스템을 개발하는 것이 필수적이다[2].

* 전북대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: soys0227@chonbuk.ac.kr

따라서 본 연구에서는 고추력 로켓시스템에 이용 가능한 산화제 과잉 예연소기 인젝터의 분무특성에 대하여 연구하고자 하며, 이를 위하여 산화제 과잉 분사시스템의 기본 형상을 설계하고 분무 두께, 액적 공간분포, 속도, 크기(SMD) 등을 측정하였다.

2. 산화제 과잉 예연소기 인젝터

현재 산화제 과잉 예연소기를 이용하고 있는 대표적인 엔진은 러시아 로켓 RD-170이다[3]. RD-170의 산화제 과잉 예연소기 작동 조건 및 기본원리를 바탕으로 연료와 산화제의 혼합비와 압력차 등을 설계점으로 결정하였고, 연료 및 산화제 오리피스 직경, 노즐 직경 등 인젝터의 주요 설계인자를 구하였다. Table 1에서 본 연구에서 사용한 설계점의 기본 사양과 RD-170의 제원이 비교를 위하여 제시되어 있다. RD-170 엔진은 진공상태에서의 추력이 7,940 kN이며, 2개의 예연소기를 가지고 있다. 본 연구에서는 RD-170의 약 10% 수준의 추력을 가정하여 연구하기로 한다[4].

Table 1. Design specifications of the ORPB injector

Specifications	Design Point	RD-170
Pressure (bar)	240	512
Total mass flow rate (kg/s)	265	1672
Number of injectors	254	254
Mixture ratio (O/F)	70	52
Oxidizer Orifice flow rate per injector (kg/s)	0.21	1.36
Oxidizer skirt flow rate per injector (kg/s)	0.82	5.44
Fuel flow rate per injector (kg/s)	0.015	0.13

3. 실험 장치

상온·대기압에서의 분무특성을 관찰하기 위해 Fig. 1과 같은 동축 스웰 인젝터를 설계하고 제작하였다. 인젝터는 3종류로 만들었으며 각각의 주요 설계인자는 Table 2와 같다. Fig. 1에서 연료 오리피스(①)는 연료가 공급되는 구멍으로 총 4개가 있으며, 산화제 오리피스(②)는 20%의 산화제가 공급되며 총 8개가 있다. 산화제 스킨트(③)는 80%의 산화제가 공급되며 총 8개의 슬롯(slot)으로 구성되며, 혼합실에서 연소된 가스를 냉각시키는 역할을 한다. 산화제는 오리피스와 스킨트로 나누어져 들어가며 각각 20%와 80%의 유량비를 갖는다. 혼합실(④)은 연료와 산화제가 혼합되고 연소되는 부분이다.

상압 환경에서 PDPA를 이용하여 액적 속도와 크기(SMD)를 측정하였다.

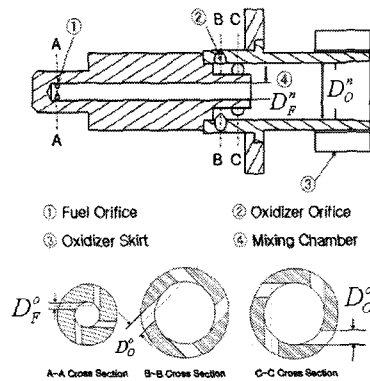


Fig. 1 Schematic of the injector

Table 2. Design parameters of ORPB injectors

Variant	1	2	3
D_F^o (mm)	0.5	0.45	0.4
D_O^o (mm)	1.4	1.2	1.0
D_F^n (mm)	1.67		
D_O^n (mm)	5.5		
No. of Fuel Orifice	4		
No. of Oxidizer Orifice	8		
No. of Oxidizer Slot	8		
Slot Area (mm ²)	2.1×2.1		

4. 실험 조건과 측정 방법

PDPA를 이용한 액적 속도와 크기(SMD) 측정 은 총 246점을 측정하였다.

Table 3에 제시된 압력 조건과 같이 Variant 1의 인젝터를 이용하여 측정하였다. 또한 Variant 1, 2, 3의 인젝터를 연료 압력 25 kgf/cm², 산화제 압력 10 kgf/cm² (F25O10)로 고정하여 측정하였다.

PDPA 측정시 각 측정점에서 10,000개의 데이터를 샘플링 하도록 하였으며, 샘플링에 소요되는 시간은 20초를 초과하지 않도록 하였다. 송광부 렌즈의 초점 거리는 500 mm이며 수광부 렌즈의 초점 거리는 600 mm이다. 수광부의 산란각은 60°이며 Angle adjustment는 0.1 mm이다. 측정 속도 범위를 결정하는 Bandwidth는 36.00 MHz로 하였다.

Table 3 Experimental conditions (Fuel+Oxidizer)
unit : kgf/cm²

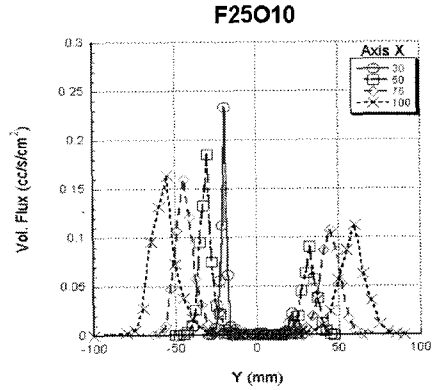
Fuel Pressure	25	25	25
Oxidizer Pressure	5	10	15
$P_{Fuel} - P_{Oxidizer}$	20	15	10

5. 실험 결과

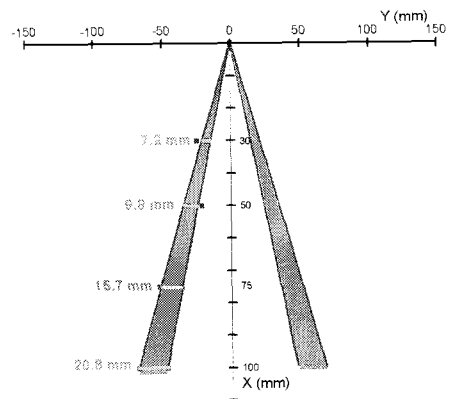
5.1 액적 분포

Figure 2의 (a)에 압력 조건이 F25O10일 때 Variant 1의 Volume flux가 제시되어 있다. Y축 0 부근의 값이 없고 분무가 하류로 진행할수록 Volume flux의 값이 커진다. 이는 분무의 형태가 증공 원추형이고 분무 분포 면적이 하류로 갈수록 점차 넓어짐을 알 수 있다. (b)는 Volume flux를 이용하여 분무 두께를 형상화한 그림이다. 본 연구에서는 각 X 위치에서 최대 Volume flux를 구하고, 최대점에서부터 68.3%(1σ)인 지점의 Y 값을 분무 두께라고 가정하였다[5]. 이 결과로부터 분무가 하류로 진행할

수록 분무 두께가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.



(a) Volume flux with F25O10



(b) Spray thickness with F25O10

Fig. 2 Volume flux and spray thickness at Variant 1

5.2 산화제 압력 변화

Figure 3에서 Fig. 7의 액적 속도와 크기 분포는 각 X축에서 Volume flux가 최대인 Y값에서 측정된 값을 표시한 것이다. Fig. 3은 연료의 압력을 25 kgf/cm²로 고정시키고 산화제의 압력을 5, 10, 15 kgf/cm²로 변화하여 측정한 액적 속도의 결과이다. 산화제의 압력이 높을수록 액적 속도가 빠르며, 노즐에서 하류방향으로 멀어질수록 속도는 감소하는 것을 알 수 있다.

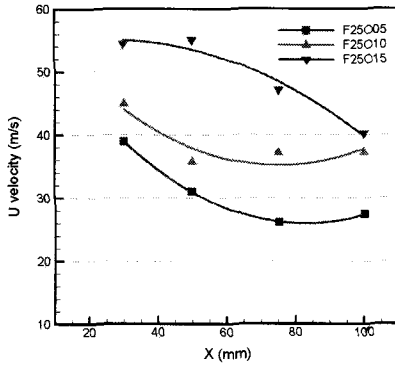


Fig. 3 Droplet velocity with Distance (Variant 1)

Figure 4는 연료 압력 25 kgf/cm², 산화제 압력 10 kgf/cm²일 경우 거리에 따른 액적크기이다. 액적 크기는 노즐 출구 30 mm의 위치에서 약 240 μm 정도로 측정되었으며 50 mm의 위치에서 약 165 μm으로 감소하는 경향을 보이나, 약 50mm 이후부터는 하류로 갈수록 액적 크기는 증가하여 노즐 출구 100 mm의 위치에서 약 210 μm정도가 됨을 볼 수 있다. 산화제 압력 5 kgf/cm²가 10, 15 kgf/cm²보다 액적 크기가 약 40% 크다는 것을 알 수 있고 산화제 10, 15 kgf/cm²의 압력에서는 액적 크기가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 따라서 산화제 분무 압력이 5 ~ 10 kgf/cm²부근에서 액적 크기가 더 이상 작아지지 않음을 알 수 있다. 모든 경우에서 노즐 출구로부터 50 mm 위치에서 미립화가 가장 잘 이루어지는 것을 알 수 있다.

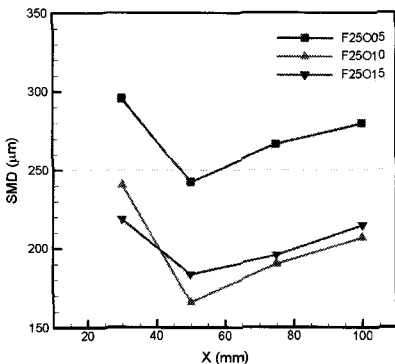


Fig. 4 SMD with Distance (Variant 1)

5.3 액적 속도와 크기

Figure 5는 노즐출구에서 길이방향의 거리에 따른 속도분포를 나타낸다. 모든 경우에서 노즐 출구로부터 거리가 멀어질수록 속도가 감소한다는 것을 알 수 있다.

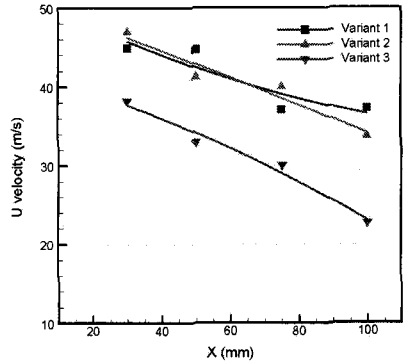


Fig. 5 Droplet velocity with Distance (F25O10)

Figure 6은 액적의 크기를 SMD로 표시한 것으로서, 노즐 끝단에서 50 mm까지 액적크기가 감소하다가 50 mm이후부터 증가 하는 것을 볼 수 있다. 이는 50 mm전까지는 분열이 진행되어 작은 알갱이로 발전함을 의미하며, 50 mm이후부터는 분열이 더 이상 진행되지 않고 오히려 작은 액적들이 큰 액적으로 상호 결합하여 액적의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이때 Variant 1의 경우 노즐 끝단에서 50 mm인 지점에서 165 μm로 최소의 직경을 가지고 있음을 볼 수 있다.

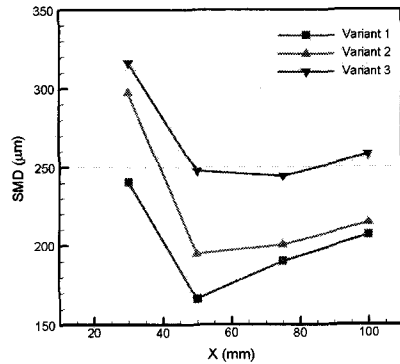


Fig. 6 SMD with Distance (F25O10)

5.4 Number Concentration

Figure 7은 Variant 1 혼합한 경우의 SMD와 Number Concentration을 같이 도시한 그래프이다. Number Concentration의 의미는 데이터 측정 영역에서의 집중도를 의미한다. 이 수가 크면 액적이 작은 알갱이로 미립화 되어 측정 영역에 분포 되어있는 것을 의미하고 이 수가 작으면 큰 액적들이 측정 영역에서 분포 되어있는 것을 의미한다[6].

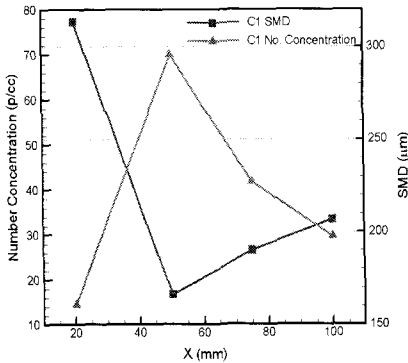


Fig. 7 SMD and Number Concentration of Variant 1 (F25O10)

노즐 끝단에서 50 mm까지 SMD는 작아지고 Number Concentration은 증가하며, 50 mm 이후부터는 SMD는 점차 증가하고 Number Concentration은 감소함을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 이는 노즐 끝단에서 50 mm전까지는 분열이 진행되어 큰 액적이 분포한다는 것을 의미한다. 50 mm이후부터 분열이 끝나 작은 액적들이 서로 충돌한 후 협착이 발생하여 액적 크기는 증가하고 Number Concentration은 감소하게 된다.

6. 결 론

산화제 과잉 예연소기 인젝터를 설계하고 시험한 결과 노즐 출구에서 최대속도가 나타나며 하류로 분사될수록 분무 알갱이들이 공기와 접촉하고 분무 입자간의 상호 충돌로 인하여 분무 속도는 감소되고 분무 입자 크기는 증가됨을 알 수 있었다. 혼합 분무의 경우 연료 압력 25 kgf/cm², 산화제 압력 10 kgf/cm² (F25O10) 조건일 때 미립화가 가장 잘 이루어지는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 키무라 이츠로, “로켓공학”, 경문사, 2004
2. G. P. Sutton, “History of liquid propellant rocket engines in the United States”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 978-1007, 2003.
3. V. Bazarov, “Development of Russian Rocketry - Historical and Technical Aspects”, 6th NRL Workshop, Issues on Rocket Engine, 2005.
4. G. P. Sutton, “History of liquid propellant rocket engines in Russia, Formerly the Soviet Union”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 1008-1037, 2003.
5. 한철호, 김수현, 장중훈, 송재복, “계측공학”, 제4판, pp. 63-69, 2002.
6. 오제하, “선회형 이류체 노즐의 분무에 관한 연구”, 전북대학교 대학원 박사학위논문, 1998.