

산화제 과잉 예연소기 인젝터의 분무 특성에 관한 연구

소윤석* · 양준호* · 한영민** · 최성만†

An Experimental Study of the Spray Characteristics for an Oxidizer-rich Preburner Injector

Y. S. So, J. H. Yang, Y. M. Han and S. M. Choi

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

Abstract

The spray characteristics of the oxidizer-rich preburner are investigated. This system is generally operated at an oxidizer-fuel mixture ratio of 50. The spray quality and mixing performance are very important for safe combustion. To know the spray characteristics of the oxidizer-rich preburner, we have designed various swirl injectors and measured droplet velocity and size by the PDPA system. The flow discharge coefficient of the fuel orifice is 0.12~0.21, oxidizer orifice discharge coefficient is 0.16~0.28. From the spray visualization, fuel nozzle spray angle is 15°~25°, oxidizer nozzle spray angle is 65°~85° and combined spray angle is reduced 2°~5° compared to the oxidizer nozzle only case. From the PDPA measurement, droplet SMD is 175 μm at 50 mm and 190 μm at 100 mm of variant 1 combined case. The number concentration measurement revealed the reason of the droplet diameter increasement with distance. That is due to drop coalescence results from collision of drops which is occurred in dense sprays at a long distance from nozzle orifice exit.

기호설명

PDPA : Phase Doppler Particle Analyzer

ORPB : Oxidizer-rich Preburner

D_F^o : Fuel Orifice Diameter [mm]

D_O^o : Oxidizer Orifice Diameter [mm]

D_F^n : Fuel Nozzle Diameter [mm]

D_O^n : Oxidizer Nozzle Diameter [mm]

ΔP : Pressure Drop [kgf/cm^2]

F25O10 : Fuel 25 kgf/cm^2 , Oxidizer 10 kgf/cm^2

SMD : Sauter Mean Diameter [μm]

1. 서 론

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

가스발생기는 전체 추진제량의 1~4%를 사용하여 연소하고 발생된 고온의 연소가스(1,400~1,600K)로 터보

(2007년 1월 11일 ~ 2007년 3월 1일 심사완료)

*전북대학교 항공우주공학과

**한국항공우주연구원 연소기그룹

†책임저자, 회원, 전북대학교 항공우주공학과

E-mail : csman@chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-3996 FAX : (063)270-2472

펌프를 구동하여 연료와 산화제를 고압의 액체 형태로 주연소실에 공급한다. 그런데 가스발생기는 터빈 블레이드의 열적 한계성으로 인하여 농후연소가 주로 이루어진다⁽²⁾. 반면 산화제 과잉 예연소기는 전체 연료의 약 5%와 전체 산화제가 혼합되어 당량비는 0.065에서 산화제 과잉 연소가 일어나고, 이 때 생성된 희박 연소 가스는 터보펌프를 구동시키게 되며, 터보펌프의 작동으로 주연소실에 총 연료의 95%를 공급한다. 그리고 터보펌프를 구동시킨 연소가스는 기체 상태의 미연소 산화제와 완전 연소된 이산화탄소와 수증기 등의 혼합 가스로 구성된다. 이러한 혼합 가스가 주연소실로 공급되며, 터보펌프에 의해 공급되는 액체 연료와 혼합되어 주연소실에서 연소가 일어난다⁽³⁾. 따라서 예연소기를 이용한 closed 사이클 형태의 로켓 엔진이 가스발생기를 이용한 open 사이클 로켓 엔진보다 효율이 높게 된다. 그러나 액체로켓에서 고효율을 추구하는 과정에서 연소 불안정 현상이 유발되는 것으로 알려져 있다. 이 때문에 고효율이며 안정적인 추진제 분사시스템을 개발하는 것이 필수적이다⁽⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 고추력 로켓시스템에 이용 가능한 산화제 과잉 예연소기 분사기의 분무특성에 대하여 연구하고자 하며, 이를 위하여 산화제 과잉 분사시스템의 기본 형상을 설계하고, 유량, 분무각, 분무입자의 크기, 속도 및 공간분포 등을 측정하고자 한다.

2. 산화제 과잉 예연소기 인젝터 설계

현재 산화제 과잉 예연소기를 이용하고 있는 대표적인 엔진은 러시아 로켓 RD-170이다⁽⁵⁾. RD-170의 산화제 과잉 예연소기 작동 조건 및 기본원리를 바탕으로 연료와 산화제의 혼합비와 압력차 등을 설계점으로 결정하

였고, 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^(6, 7). RD-170 엔진은 진공 상태에서의 추력이 7,940 kN이며, 2개의 예연소기를 가지고 있다. 본 연구에서는 RD-170의 약 10% 수준의 추력을 가정하여 연구하기로 한다.

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.

산화제 과잉 예연소기 인젝터의 분무각을 측정하기 위해 300W의 순간조명 2개로 CCD 카메라와 동기화시켜서 촬영을 했으며, CCD 카메라의 셔터 속도는 1/4000, F 수는 11을 이용하였다.

PDPA를 이용하여 액적의 크기와 속도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였으며 Variant 1을 이용하여 입자의 크기 및 속도를 측정하였다. 실험장

Table 1 Design Specifications of the ORPB injector

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

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
No. of Oxidizer Orifice	8 개		
No. of Fuel Orifice	4 개		
Slot Area (mm ²)	2.1 × 2.1		
Number of Slot	8 개		
D_F^n (mm)	1.67		
D_O^n (mm)	5.5		

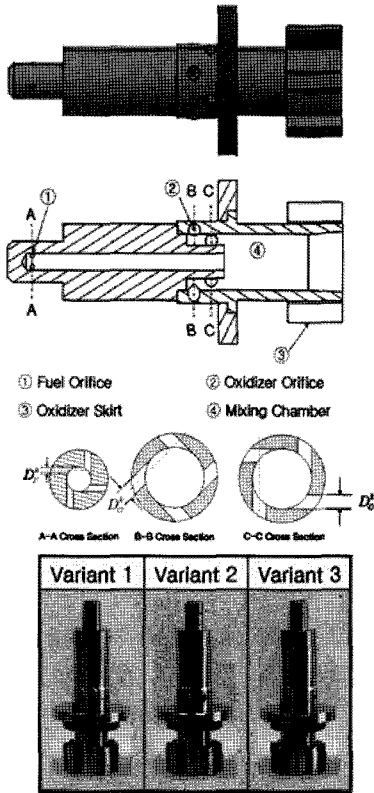


Fig. 1 Schematics of the injector

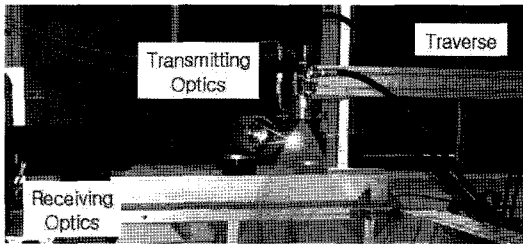


Fig. 2 PDPA system

치는 물공급부, PDPA 측정부, 데이터 처리부로 이루어져 있다.

물 저장탱크에서 정화필터를 통과한 물을 인젝터로 공급하기 위해 10마력 펌프를 이용하였다. 펌프에서 나온 물은 니들밸브와 볼밸브를 사용하여 모의 연료인 물과 모의 산화제인 물의 압력을 조절한 후 인젝터에 공급하였다. 공급되는 모의 연료와 모의 산화제의 압력은 압력센서(Sensys, PTCE0030KCBA)와 컴퓨터 프로그램(Labview)을 연동하여 측정하였다. PDPA 측정부는 레이저 발진부와 광학계로 구성되어 있다. 광원으로 이용된 레이저 발진부는 수냉식 Ar-ion 레이저(6W, DANTEC)를

사용하였다. 광학계는 송광부와 수광부로 구성되어 있으며 레이저 빔은 광섬유, 송광부, 빔확장기를 차례로 거쳐 나오고 분무된 액적에서 산란된 신호는 수광부로 입력된 후 데이터 처리부인 신호처리기와 컴퓨터 프로그램인 Sizeware를 이용하여 액적의 크기와 속도를 분석한다. 신호처리기(DANTEC, 58N10)는 버스트(Burst) 검출방식을 이용하였으며, 분무액적의 크기와 속도는 각각 도플러 신호의 상대적 위상차와 주파수 크기에 의해 계산된다.

4. 실험 조건과 측정 방법

설계한 산화제 과잉 예연소기 인젝터의 연료와 산화제를 0~25 kgf/cm²까지 순차적으로 압력을 증가시켜 가며 유량, 유출계수, 분무각을 구하였고, 연료와 산화제가 혼합된 유량은 압력조건을 Table 3과 같이 하여 유량 및 분무각을 구하였다. 유출계수는 노즐을 기준으로 하였으며 연료, 산화제, 연료+산화제 유량은 각 3번씩 10초간 측정하여 평균유량을 구하였다.

PDPA를 이용한 입자의 크기 및 속도 측정은 총 246 점을 측정하였고, 측정 위치는 Fig. 3과 같다. PDPA 측정시 각 측정점에서 10,000개의 데이터를 샘플링 하도록 하였으며, 샘플링에 소요되는 시간은 20초를 초과하지 않도록 하였다. 송광부 렌즈의 초점 거리는 500 mm이며 수광

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

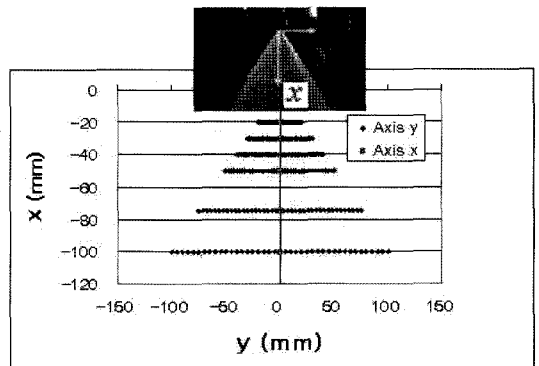


Fig. 3 Measuring points of PDPA

부 렌즈의 초점 거리는 600 mm이다. 수광부의 산란각은 60°이며 Angle adjustment는 0.1 mm이다. 측정 속도 범위를 결정하는 Bandwidth는 36.00 MHz로 하였다. Table 3에 PDDA 측정시의 압력 조건이 제시 되어있다.

5. 실험 결과

5.1 유량

연료 유량은 25 kgf/cm²의 압력에서 14.6 g/s, 산화제 유량은 10 kgf/cm²의 압력에서 204.8 g/s로 예상하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 연료는 Variant 3이 17.2 g/s, 산화제는 Variant 2가 214.5 g/s로 설계점과 가장 유사하였다.

5.2 유출계수

식 (1)을 이용하여 연료, 산화제 노즐의 유출계수를 각각 구하였다.

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta p}}$$

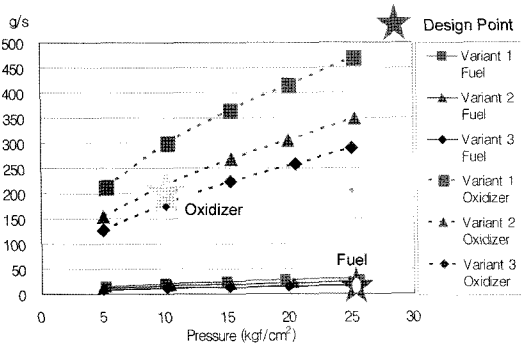


Fig. 4 Massflow rate

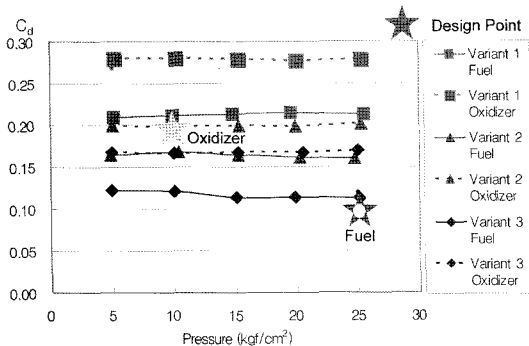
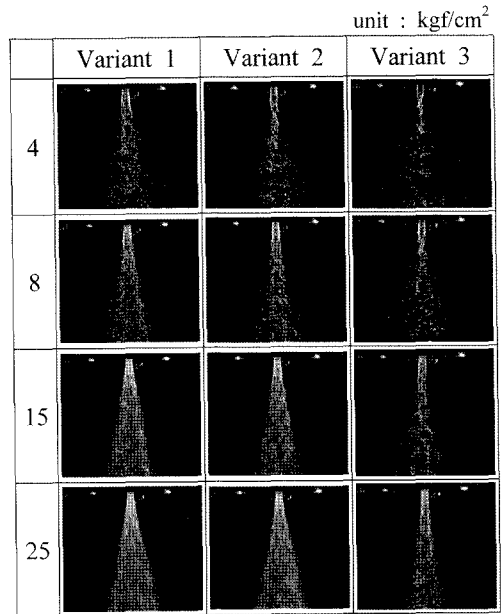


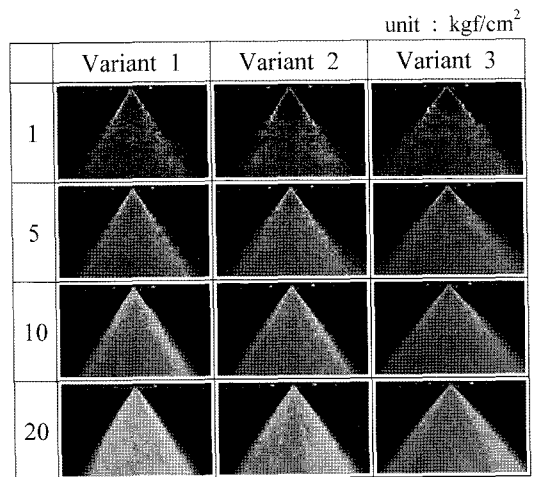
Fig. 5 Discharge coefficient

Figure 5에서 Variant 별 유출계수는 압력에 따라 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 연료 및 산화제 오리피스의 직경이 가장 큰 Variant 1의 유출계수가 가장 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

연료 노즐의 유출계수는 25 kgf/cm²의 압력에서 0.120으로 예상하였으며, 측정 결과 Variant 3이 가장 유사하며 이때 유출계수는 0.114이었다. 산화제 노즐의 유출계수는 10 kgf/cm²의 압력에서 0.20으로 예상하였으며 측정 결과 Variant 2의 경우와 유사하며 유출계수는 0.20이었다.



(a) Fuel Orifice



(b) Oxidizer Orifice

Fig. 6 Spray shape with Injection pressures

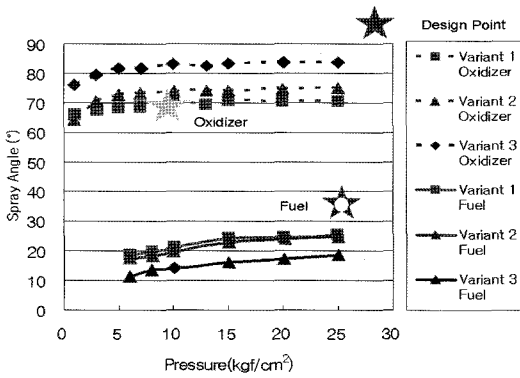


Fig. 7 Spray angle of fuel and oxidizer nozzle

5.3 분무각

Figure 6에 연료 및 산화제를 각각 공급할 때 압력에 따른 분무사진이 제시되어 있다. Fig. 6(a) 연료의 경우 분무각은 매우 작고, 압력 15 kgf/cm² 이상에서 미립화가 어느 정도 이루어지는 것을 볼 수 있다. 또한 오리피스 직경 0.4 mm인 Variant 3의 경우 분무 특성은 좋지 않음을 볼 수 있다. Fig. 6(b) 산화제의 경우 분무각은 Variant 별 큰 차이는 없고 거의 유사함을 알 수 있고 압력 10 kgf/cm² 이상에서 미립화가 어느 정도 이루어지는 걸 볼 수 있다.

Figure 7에 압력에 따른 분무각이 제시되어 있다. 연료의 분무각은 모든 Variant가 25° 이내로 측정되었으며, 이것은 설계점인 37°보다 다소 낮은 값을 가진다. 산화제의 경우 모든 Variant가 65°~85° 사이의 분무각을 가지며 Variant 1이 설계점인 70°를 만족함을 알 수 있다.

Figure 8에는 연료와 산화제를 동시에 공급하였을 때의 분무사진이 제시되었다. 분무 측정 결과 산화제의 공급 압력에 따라 분무 특성이 결정됨을 알 수 있다. 즉

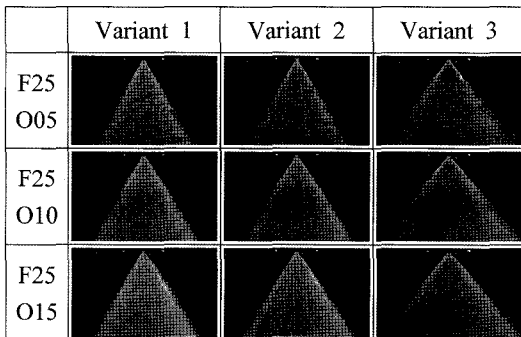


Fig. 8 Photographs of the Combined Spray (Fuel+Oxidizer)

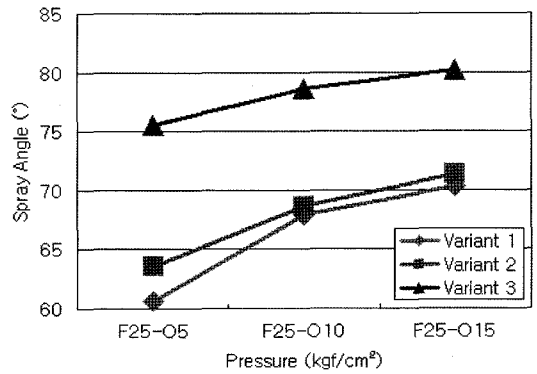


Fig. 9 Spray angle of fuel and oxidizer nozzle

유량이 산화제보다 10배 이상 작은 연료의 압력은 분무 특성에 거의 영향을 주지 않는 것으로 판단 할 수 있다.

Figure 9에는 연료와 산화제를 혼합하였을 경우의 분무각을 그래프로 나타낸 것이다. 연료의 압력은 25 kgf/cm²으로 고정하고 산화제의 압력을 5, 10, 15 kgf/cm²로 증가 시킬수록 분무각은 점차 커짐을 알 수 있고, 압력이 같은 경우 오리피스의 직경이 작을수록 분무각은 커진다. 이는 산화제의 유량이 노즐 밖으로 나올 때 접선의 방향 속도가 커져 분무각이 커짐을 의미한다.

5.4 액적의 속도 및 크기 분포

Figure 10에 PDPA를 이용한 분무 측정 결과로 Volume flux를 볼 수 있다. Y축 0 부근의 값이 없고 분무가 하류로 진행할수록 분무 분포 면적이 넓어져 분무

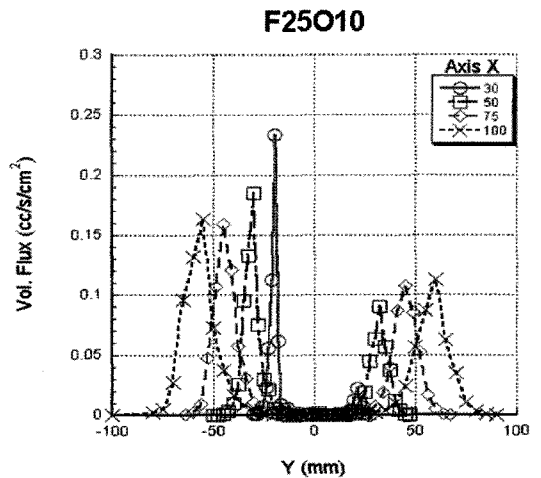
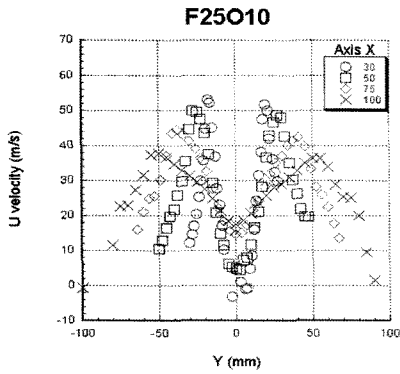
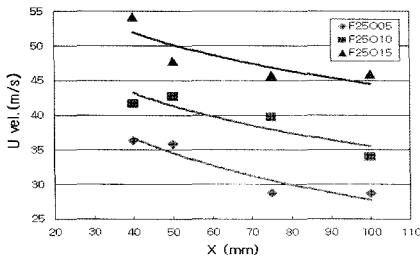


Fig. 10 Distribution of droplet Volume flux



(a) U velocity with lateral direction



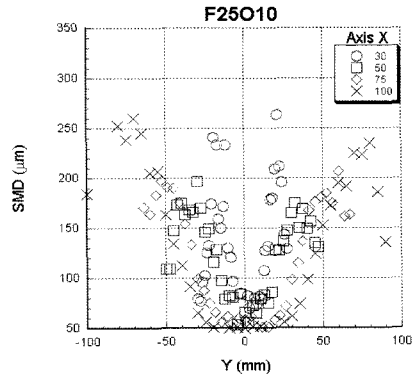
(b) Maximum U velocity with longitudinal direction

Fig. 11 Droplet velocity distribution of Variant 1 Combined case

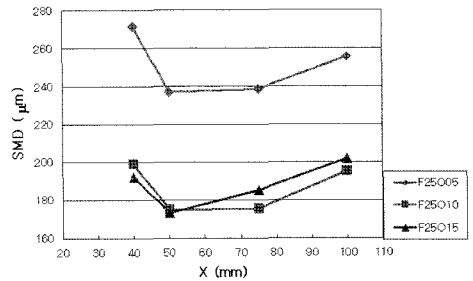
의 형태가 증공 원추형임을 알 수 있다.

Figure 11의 (a)에서 볼 수 있듯이 분무 액적의 속도는 최대 55 m/s 정도이나 노즐에서 멀어질수록 점점 작아져서 100 mm 위치에서 38 m/s 정도 감소함을 볼 수 있다. 그리고 속도의 분포는 선화형 노즐의 일반적 형태인 증공 원추형 분무 구조를 나타내고 있다. Fig. 11의 (b)는 연료의 압력을 25 kgf/cm²로 고정시키고 산화제의 압력을 5, 10, 15 kgf/cm²로 변화하여 측정된 결과이다. 산화제의 압력이 높을수록 액적의 속도가 빠르며, 노즐에서 하류방향으로 멀어질수록 속도는 감소하고 있음을 볼 수 있다.

Figure 12의 (a)에서 볼 수 있듯이 측정점에서의 액적 크기(SMD)를 나타내었다. 연료 압력 25 kgf/cm², 산화제 압력 10 kgf/cm²일 경우 Fig. 12의 (b)에서 볼 수 있듯이 액적 크기(SMD)는 노즐 출구 40 mm의 위치에서 약 200 μm 정도로 측정되었으며 50 mm의 위치에서 약 175 μm으로 감소하는 경향을 보이다가 75, 100 mm 즉 하류로 갈수록 SMD는 증가하여 노즐 출구 100 mm의 위치에서 약 190 μm 정도가 됨을 볼 수 있다. 또한 모든 혼합한 압력은 노즐 출구부터 50 mm까지 액적 크기는



(a) SMD with lateral direction



(b) Maximum SMD with longitudinal direction

Fig. 12 Droplet diameter distribution of Variant 1 Combined case

작아지고 50 mm부터 100 mm까지 액적 크기는 커진다. 이는 Fig. 13에 설명하였다. 또한 산화제 압력 5 kgf/cm²가 10, 15 kgf/cm²보다 액적 크기가 약 40% 정도 크다는 것을 알 수 있고 산화제 10, 15 kgf/cm²의 압력에서는 액적 크기가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이로 인해 산화제 분무 압력이 5~10 kgf/cm²에서 액적 크기가 안정화 된다는 것을 판단 할 수 있다. 또한 전반적으로 차압이 15 kgf/cm² 즉 F25O10일 때 미립화가 우수하였으며 특히 50 mm의 위치에서 175 μm로 미립화가 가장 잘 되었다.

Fig. 13은 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⁽⁸⁾. 노즐 끝단에서 50 mm까지 SMD는 작아지고 Number Concentration은 증가하며, 50 mm 이후부터는 SMD는 점차 증가하고 Number Concentration은 감소함을 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 이는 50 mm전까

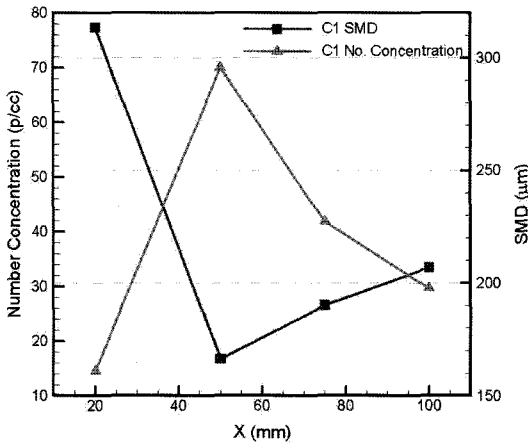


Fig. 13 SMD and number concentration of Variant 1 (F25O10)

지는 분열이 진행되어 큰 액적이 분포한다는 것을 의미한다. 50 mm 이후부터 분열이 끝나고, 밀도가 높은 영역에서의 작은 액적들이 서로 충돌하여 협착이 발생하여 액적의 크기는 증가하고 Number Concentration은 감소하게 된다.

6. 결 론

산화제 과잉 예연소기 인젝터를 설계하고 시험한 결과는 다음과 같다.

1) 연료 오리피스스의 유량계수는 0.12~0.21 정도 이고 Variant 3이 0.12로 설계점인 0.114와 가장 유사한 결과를 보였으며, 산화제 오리피스스의 유량계수는 0.16~0.28 정도 이고 Variant 2가 0.20으로 설계점과 가장 비슷하였다.

2) 분무각은 산화제의 경우 65°~85° 사이이고 압력 10 kgf/cm²에서 Variant 1이 68°로 설계점 70°와 가장 유사하였다. 연료의 경우는 15°~25° 사이이고 설계점 37°보다 다소 낮은 값을 가진다. 연료와 산화제의 혼합된 경우는 산화제만 분사한 경우보다 2°~5° 정도 감소하고 F25O10의 경우 67°이다.

3) 액적 입자의 분포는 중공 원추형이고 액적 속도는 노즐 출구에서 가장 크며 하류로 갈수록 감소한다. 또한

산화제의 압력이 커질수록 속도는 증가한다. F25O10의 조건에서 속도는 50 m/s에서 38 m/s로 감소한다.

4) 액적 크기는 F25O10의 조건에서 노즐 출구 40 mm의 위치에서 약 200 μm 정도로 측정되었으며 50 mm의 위치에서 약 175 μm으로 감소하고 하류로 갈수록 액적 크기는 증가하여 노즐 출구 100 mm의 위치에서 약 190 μm 정도가 된다. 본 연구에서 노즐 출구 50 mm에서 175 μm로 미립화가 가장 잘 이루어지는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2006년도 한국항공우주연구원의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 키무라 이츠로, “로켓공학”, 경문사, 2004.
- (2) G. P. Sutton, “Rocket propulsion elements”, Seventh Edition.
- (3) L. Schoenman, “Fuel/oxidizer-rich high-pressure preburners”, NASA CR 165404, October, 1981.
- (4) 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.
- (5) V. Barzarov, “Development of Russian Rocketry - Historical and Technical Aspects”, 6th NRL Workshop, Issues on Rocket Engine, 2005.
- (6) 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.
- (7) A. W. Huebner, “High-pressure LOx/Hydrocarbon preburners and gas generators final report”, NASA CR 161814, April, 1981.
- (8) 오제하, 선회형 이류체 노즐의 분무에 관한 연구, 전북대학교 대학원 박사학위논문, 1998.