

로켓 프리버너 분사기의 성능특성 연구

양준호* · 소윤석* · 최현경* · 최성만** · 한영민***

An Experimental Study of the Rocket Preburner Injector

Joonho Yang* · Younseok So* · Hyunkyung Choi* · Seongman Choi** · Youngmin Han***

ABSTRACT

The oxidizer-rich preburner is applied to the high efficiency closed cycle rocket propulsion system. This system is generally operated on oxidizer-fuel mixture ratio over than 50. The spray quality and mixing performance are very important for safe combustion of this preburner. This paper presents basic concept and spray characteristic of the preburner injector.

초 록

산화제 과잉 예연소기는 고성능 closed cycle 액체추진로켓 시스템에 적용된다. 이러한 산화제 과잉 연소기는 산화제-연료 혼합비가 약 50이상에서 작동하므로, 예연소기에서 분무특성과 혼합성능이 연소 안정성에 큰 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 예연소기에 적용 가능한 분사기를 설계하고, 유량 측정, 가시화 실험을 수행하여 예연소기 분사기의 분무특성을 연구하기로 한다.

Key Words: Oxidizer-rich preburner(산화제 과잉 예연소기), Swirl injector(와류 분사기), Discharge coefficient(유출계수), Spray characteristics(분무특성)

기호 설명

α : spray angle	F_j : flow area of jet injector
a : r_{mk}^2 / R_n^2	F_m : flow area of orifice
φ : flow area coefficient	D_n : diameter of nozzle
μ : mass flow coefficient	D_m : diameter of orifice
A : geometrical characteristics($\sqrt{a/\mu}$)	R_n : bottom radius of nozzle
F_n : flow area of nozzle	R_m : top radius of nozzle
	D_o^h : oxidizer orifice diameter
	D_f^h : fuel orifice diameter
	D_o^N : oxidizer nozzle diameter
	D_f^N : fuel nozzle diameter
	\dot{m} : mass flow rate

* 전북대학교 항공우주공학과, 공업기술연구소센터

** 전북대학교 항공우주공학과, 공업기술연구소센터

*** 한국항공우주연구원 연소기그룹

연락처, E-mail: 1730joon@daum.net

1. 서 론

액체로켓 추진제 공급 시스템은 고압가스로 추진제를 주연소실에 공급하는 가압 시스템과 터보펌프를 이용해 주연소실로 고압의 추진제를 공급하는 터보펌프 시스템으로 분류된다. 터보펌프 공급방식은 엔진 시스템의 구조가 복잡해져 소형 로켓에 사용이 불리하나 연료탱크가 저압이므로 구조중량이 감소되어 성능이 향상되는 장점이 있다. 따라서 액체추진 로켓의 대형화와 성능증가를 위하여 터보펌프 시스템 개발이 필수적이다[1]. 터보펌프 시스템은 다시 가스발생기를 이용한 개방형 엔진과 예연소기를 이용한 폐쇄형 엔진으로 구분할 수 있다. 개방형 엔진 가스 발생기는 연소 가스가 터빈을 구동시킨 후 밖으로 배출된다. 폐쇄형 엔진 예연소기(산화제 과잉)는 일부 연료(약 5%)와 모든 산화제의 혼합으로 당량비 15정도인 산화제 과잉 연소가 일어나고 이때 생성된 희박 연소 가스는 터보펌프를 구동시키게 되며, 발생하는 터보 펌프의 구동력으로 주연소실에 잔여연료 95%를 공급하게 된다. 터보펌프를 구동시킨 고온의 산화제 과잉 연소가스는 주연소실로 이동되며, 주연소실에서는 액체 연료와 산화제 과잉 연소가스가 혼합되어 연소가 일어난다[2].

본 연구는 산화제 과잉 예연소기에 적용 가능한 추진제 분사 시스템을 설계하고, 유량 측정 및 가시화 실험을 통하여 분무특성을 이해하는 것이며, 이를 통하여 최적의 분사기 시스템을 위한 기초 자료를 획득하고자 한다.

2. 분사기 설계

산화제 과잉 예연소기 분사기의 기본 설계개념은 Fig. 1에 제시되어 있다. 연료 오리피스를 통해 공급되는 고압의 연료와 산화제 오리피스에 의해 공급되는 산화제는 혼합실(mixing chamber)에서 혼합되어 연소되며 이때 산화제-연료 혼합비는 14정도이다. 연소된 가스는 Oxidizer Skirt를 통해 흐르는 산화제에 의해 냉

각되며 이때 산화제의 양은 전체 공급 산화제의 약 80%정도이며, 최종 산화제-연료 혼합비는 약 70정도이다. 혼합실 내에서의 연료-산화제 혼합 현상을 가시화하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 혼합실 부근을 절단한 모델도 함께 실험에 이용하였다.

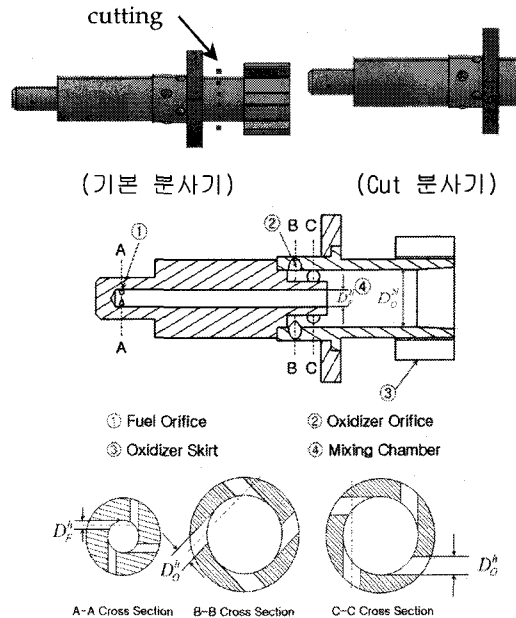


Fig. 1 Schematics of the Injector

본 연구를 위하여 설정한 설계점은 Table 1에 제시되어 있으며, 비교를 위하여 RD-170 엔진의 설계점을 첨부하였다[3].

Table 1. Design Specifications of the Oxidizer-rich Preburner Injector

Specification	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(1 injector)	0.21 kg/s	1.36 kg/s
	Oxidizer skirt flow rate(1 injector)	0.82 kg/s	5.44 kg/s
	Fuel flow rate (1 injector)	0.015 kg/s	0.13 kg/s

분사기 설계시 연료공급압력은 $25 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, 산화제 공급압력은 $10 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 로 설정하였다. 이때 연료와 산화제의 압력차가 $15 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 로 유지하도록 하여 혼합실 내에서의 혼합특성이 극대화 되도록 하였다. Table 2에 설계된 분사기의 구체 제원이 제시되어 있다. 연료노즐의 직경은 1.67 mm, 산화제 노즐의 직경은 5.5 mm로 설정하였다. 오리피스는 설계압력에서 연료만 공급할 경우 분무각은 40° , 산화제만 공급할 경우 분무각은 70° 가 되는 것을 기준으로 정하였으며, 계산 방식은 V. Barzarov[4]에 의해 제시된 식을 이용하여 분사기를 설계하였다. 즉 분무각 α 로부터 (1-6) 식을 이용하여 오리피스 개수(n) 및 직경(D_{in})을 구할 수 있다.

$$\alpha = 2 \arctan \sqrt{\frac{a}{1-a}} \quad (1)$$

$$\sqrt{a} = (1 - \varphi) \sqrt{\frac{2}{2 - \varphi}} \quad (2)$$

$$\frac{\sqrt{a}}{\mu} = \frac{(1-\varphi)\sqrt{2}}{\varphi\sqrt{\varphi}} \quad \therefore \mu = \frac{\sqrt{a} \times \varphi \sqrt{\varphi}}{(1-\varphi)\sqrt{2}} \quad (3)$$

$$A = \frac{\sqrt{a}}{\mu} \quad (4)$$

$$F_n = \frac{F_j}{\mu} \quad ; \quad D_n = \sqrt{\frac{4F_n}{\pi}} \quad (5)$$

$$\bar{R}_{in} = \frac{R_{in}}{R_n} \quad ; \quad \bar{F}_{in} = \frac{\bar{R}_{in}}{A} \quad ; \quad F_{in} = \bar{F}_{in} \cdot F_n$$

$$D_{in} = \sqrt{\frac{4F_{in}}{\pi n}} \quad (6)$$

Table 2에 계산된 분사기 제원이 제시되어 있으며, Variant 2를 기준 값으로 산화제 오리피스는 0.2 mm, 연료 오리피스는 0.05 mm 증감을 하여 각각 Variant 1과 3을 설정하여 오리피스의 크기에 따른 영향을 알아보려고 하였다.

또한 분사기 노즐길이의 변화에 따른 분무특성을 알아보기 위해 노즐 끝단으로부터 8 mm 되는 지점을 자르고, 그 지점에서부터 노즐 길이를

Table 2. Injector Detail Dimension

Item	Variant 1	Variant 2	Variant 3
D_O^h	1.4 mm	1.2 mm	1.00 mm
Number of Oxidizer holes	8 개	8 개	8 개
Slot	2.2×2.2	2.2×2.2	2.2×2.2
Slot 개수	8 개	8 개	8 개
D_F^h	0.5 mm	0.45 mm	0.40 mm
Number of Fuel holes	4 개	4 개	4 개
Total length	3.83 mm	3.83 mm	3.83 mm
D_F^N	1.67 mm	1.67 mm	1.67 mm
D_O^N	5.5 mm	5.5 mm	5.5 mm

1.5, 5.5, 9.5, 13.5 mm 증가할 수 있는 Add 1, 2, 3, 4를 추가적으로 설계 및 제작하였다. 실험에 이용된 분사기의 형상은 Fig. 2에 제시되어 있다.

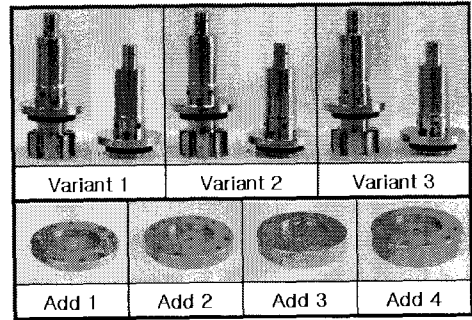


Fig. 2 Photographs of the Injector

3. 실험 조건

본 연구에서는 모의 추진제로 물을 사용하였고, 압력범위를 $0 \sim 25 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 로 하여 Variant별 유량 및 유출계수와 분무각을 측정하였다. 유출계수는 분사압력조건에서 분사유량을 예측하는데 사용되며 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \frac{\dot{m}}{\pi D_n^2 \sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (7)$$

여기에서 유출계수는 노즐 직경을 기준으로 구하였다. 유량 측정은 연료, 산화제의 경우 5 kgf/cm² 간격으로 증가시켜가며 측정하였고, 연료와 산화제를 동시에 공급할 경우는 Table 3에서와 같이 차압을 5, 10, 15 kgf/cm²로 하여 측정하였다. 냉각을 위하여 skirt로 공급되는 산화제는 0.5, 2, 4, 6 kgf/cm²에서 측정하였다.

분무각은 연료와 산화제의 경우 0~25 kgf/cm²에 걸쳐 측정하였으며, 연료+산화제는 Table 3과 같은 조건하에서 측정하였다. 이때 분무각 측정을 위해 300 W 순간조명 2개를 CCD 카메라와 동기화시켜 촬영하였으며, 셔터 속도는 1/4000, F 수는 11, ISO는 200으로 하였다. 또한 분사기 노즐길이의 변화에 따른 분무형상을 알아보기 위해 Add 1, 2, 3, 4를 부착하여 분무각을 측정하였다.

Table 3. Test Conditions of Combined Case (Fuel+Oxidizer)

unit : kgf/cm²

차 압	5				10				15	
Fuel	10	15	20	25	15	20	25	20	25	
Oxidizer	5	10	15	20	5	10	15	5	10	

4. 실험결과 및 분석

4.1 유량 측정

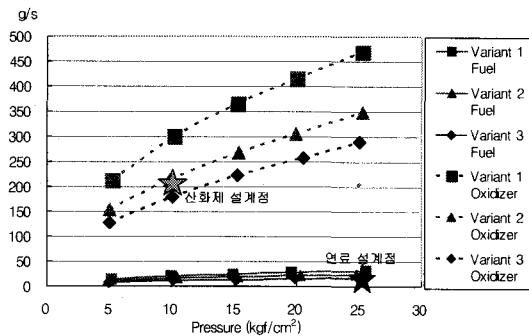


Fig. 3 Mass Flow Rate of Fuel and Oxidizer

설계점에서 연료 유량은 25 kgf/cm²일 때 14.9 g/s이고, 산화제는 10 kgf/cm²일 때 205 g/s로 예상하였으며, 측정 결과 Fig 3에서와 같이 연료는 Variant 3이 17.2 g/s로, 산화제는 Variant 2가 214.5 g/s로 가장 유사한 결과를 보였다. 또한 skirt는 10 kgf/cm²에서 0.82 kg/s를 예상하였으며 측정결과 4 kgf/cm²에서 0.8 kg/s가 되어 설계 예상치보다 많은 양이 측정되었다.

4.2 유출계수

유출계수는 Fig. 4에서 보듯이 압력 증가에 따른 변화가 거의 없으며, 유출면적이 커짐에 따라 유출계수가 증가함을 알 수 있다. 연료의 유출계수는 25 kgf/cm²에서 0.12이고, 산화제는 10 kgf/cm²에서 0.27로 예상하였으며, 측정결과 연료는 Variant 3이 0.114로, 산화제는 Variant 1이 0.280로 설계치와 유사한 결과를 얻었다. 또한 skirt는 10 kgf/cm²에서 0.47로 예상하였으나, 측정결과 0.774로 예상치 보다 높은 값을 보였다.

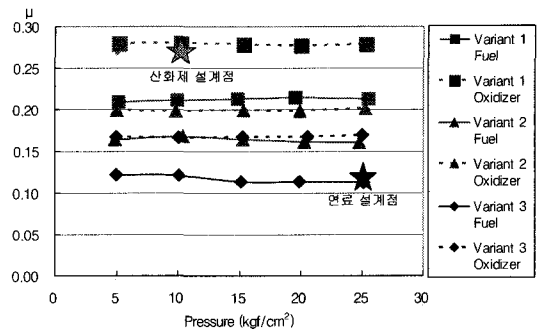


Fig. 4 Discharge Coefficient of Fuel and Oxidizer

4.3 분무각

Figure 5에 연료만 분사한 경우의 분무사진이 제시 되어있고 Fig. 6에 각 Variant에 대한 분무각을 그래프로 제시하였다. Fig. 5에서 분무압이 15 kgf/cm² 이하에서 분열을 진행하다 그 이후부터는 일정한 형상을 가짐을 볼 수 있다. 오리피스 직경이 0.4 mm인 Variant 3의 경우 25 kgf/cm² 압력에서도 분무는 정상적으로 이루어지지 않고 있음을 볼 수 있다. 25 kgf/cm² 압력

에서 분무각은 Variant 1이 25°이고 Variant 2가 22°이며 Variant 3은 18°로써 오리피스 직경이 0.5 mm에서 0.4 mm로 감소할수록 분무각이 작아짐을 알 수 있다. 또한 압력이 증가함에 따라 분무각도 증가하는 경향이 있으며 약 20 kgf/cm²에서 일정한 값을 유지함을 볼 수 있다. 그러나 초기 예상치인 분무각 40°보다 모든 Variant가 낮은 값을 가지고 있다.

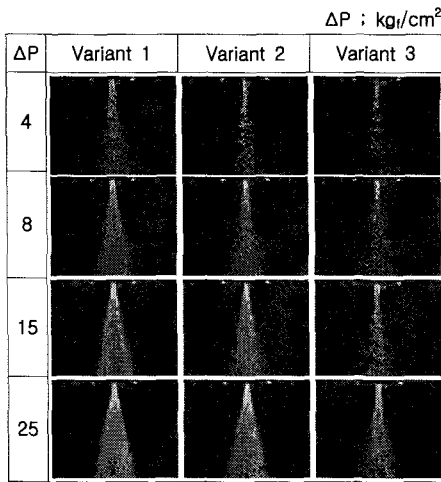


Fig. 5 Photographs of the Fuel Spray

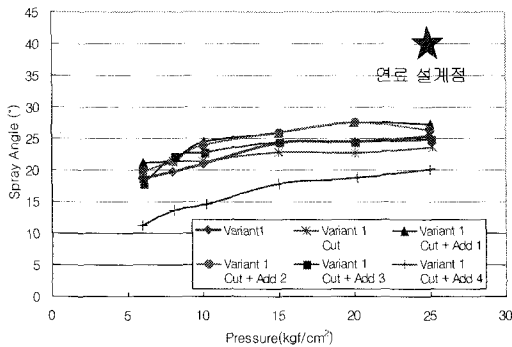


Fig. 6 Fuel Spray Angle of Variant 1

Figure 7은 산화제만 분사할 경우 분무사진이 제시되어 있고 Fig. 8에 Variant 1에 대한 분무각이 그래프로 표시되어있다. Fig. 7에서 분무압이 1 kgf/cm²에서 입자로 분열을 시작하여 약

10 kgf/cm² 정도에서 일정한 분무형상을 유지함을 알 수 있다. 분무압이 20 kgf/cm²로 증가할 경우 입자의 크기는 더욱 작아짐을 볼 수 있다. 산화제의 분무각은 10 kgf/cm²에서 70°를 예상하였으며, 측정결과 Variant 1이 70.5°로 설계조건과 같은 분무각을 보였다. 산화제의 경우 오리피스 직경이 1.0 mm(Variant 3)에서 1.4 mm(Variant 1)로 커짐에 따라 분무각은 83.7°에서 70.6°로 작아졌다. Fig. 8에서 연료의 경우와 마찬가지로 압력이 증가하면 분무각도 증가하다가 15 kgf/cm² 이상부터는 일정한 각도를 가짐을 알 수 있다.

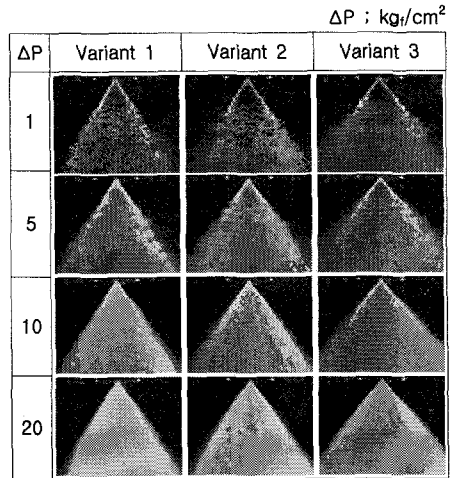


Fig. 7 Photographs of the Oxidizer Spray

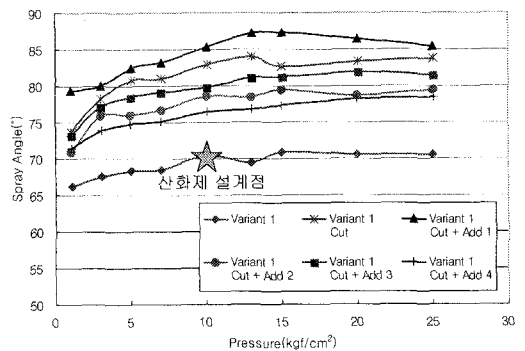


Fig. 8 Oxidizer Spray Angle of Variant 1

Figure 9는 연료와 산화제를 동시에 공급할 경우의 분무사진이고 Fig. 10은 이 경우에서 Variant 1에 대한 분무각을 그래프로 표시한 것이다. 분무사진에서 연료와 산화제를 동시에 공급할 경우 분무 형태는 압력에 따라 거의 유사하며 분무각은 약 70°~80° 사이에 있으나 skirt로 80%의 산화제를 공급할 경우 분무각은 약 25°~35°로 축소됨을 볼 수 있다. Fig. 10에서 연료와 산화제의 압력차가 커질수록 분무각이 작아짐을 볼 수 있고, 이것은 연료 분무압이 커짐에 따라 산화제 분무가 중심 방향으로 모아짐을 알 수 있다.

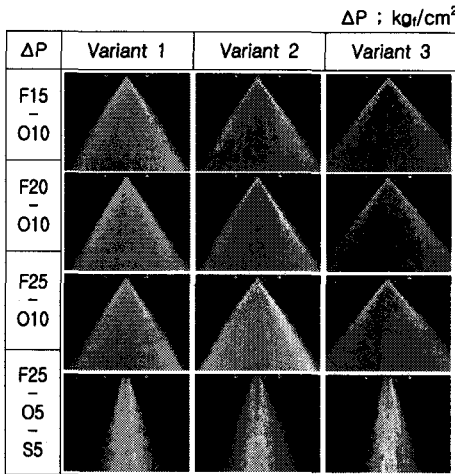


Fig. 9 Photographs of the Combined Spray (Fuel, Oxidizer, Oxidizer Skirt)

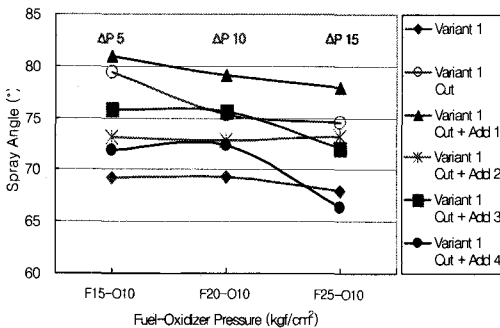
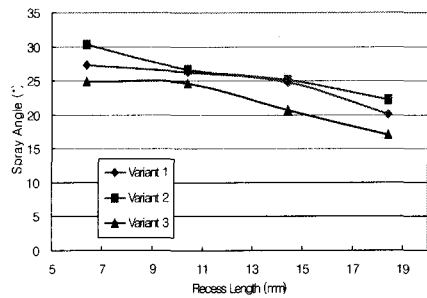
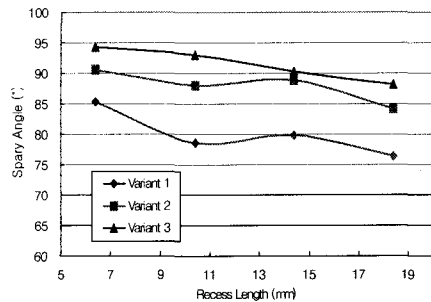


Fig. 10 Combined Spray Angle of Variant 1 (Fuel+Oxidizer, without skirt)

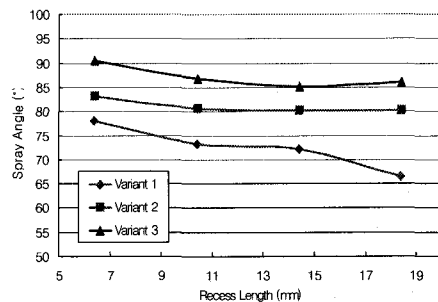
Figure 11에 Recess length에 따른 분무각이 제시 되어있다. 모든 Variant에서 Recess length가 증가함에 따라 분무각이 감소함을 알 수 있다. Variant 2의 경우 Recess length가 6.4 mm에서 18.4 mm로 증가할 경우 연료는 약 9°정도 감소되고 산화제는 약 6°정도 감소되며 연료와 산화제를 동시에 공급할 경우 약 3°정도 감소함을 볼 수 있다. 이것은 와류형 분사기에서 유체의 회전성분이 Recess length의 증가에 따라 점차 감소하여 분무각이 감소되는 이유로 판단된다.



(a) Fuel Spray Angle (25 kgf/cm^2)



(b) Oxidizer Spray Angle (10 kgf/cm^2)



(c) Combined Spray Angle (Fuel 25 kgf/cm^2 , Oxidizer 10 kgf/cm^2)

Fig. 11 Spray Angle for Variable Recess Length

5. 결 론

산화제 과잉 예연소기에 적용가능한 분사기를 설계 제작하여 시험평가 하였다. 측정결과 분사기의 유량 및 분무특성을 이해할 수 있었다. 또한 연료만 공급할 경우 분무각은 $18^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 사이로 매우 작은 값을 나타내었고, 산화제만 공급할 경우 $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 정도의 분무각을 나타내었다. 연료와 산화제를 동시에 공급할 경우 분무각은 산화제만 공급할 경우보다 약 5° 정도 감소됨을 알 수 있었다. 그리고 Recess length가 증가할 경우 분무각은 점차 감소함을 알 수 있었다.

이러한 실험 결과로부터 산화제 과잉 예연소기의 분사기를 설계할 수 있는 기초 자료를 획득할 수 있었다. 향후 분무입자의 속도 및 크기에 대한 정량적인 실험 연구가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 전북대학교 공업기술연구센터의 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. P. Sutton, "Rocket propulsion elements", Seventh Edition, pp. 197~265, 2001.
2. L. Schoenman, "Fuel/oxidizer-rich high-pressure preburners," NASA CR 165404, October, 1981.
3. V. Barzarov, "Development of Russian Rocketry-Historical and Technical Aspects", 6th NRL Workshop, Issues on Rocket Engine, 2005.
4. V. Barzarov, "Lecture on Liquid Propellant Rocket Engine Injectors", Seoul National University, Jan. 28 ~ Feb. 8, 2002.