

액체로켓용 FOOF와 FOF 인젝터의 분무특성 비교

임병직*, 정기훈**, 윤영빈***

The Comparison of Spray Characteristics between FOOF and FOF Injectors used in Liquid Rockets

Byoungjik Lim*, Kihoon Jung** and Youngbin Yoon***

ABSTRACT

Triplet(FOF or OFO) injectors are commonly applied to liquid rockets which use LOX and hydrocarbon propellants. The FOF type injector has been known to have an advantage for the although to show lower combustion performance as compared by the OFO type. However, a large disparity between oxidizer and fuel orifice diameters of the FOF type injector may reduce both the combustion efficiency and stability so that as FOOF split triplet injector which splits a single oxidizer orifice into double orifices was designed. In the present study, spray characteristics of the FOOF injector were investigated and compared with those of the FOF injector under cold flow conditions. Mass distributions of oxidizer and fuel for both injectors were measured by using a PLLIF (Planar Liquid Laser Induced Fluorescence) technique, and each drop size was also measured by using an instantaneous photographic method. From the experimental results, we found out that FOOF shows more stable mixing efficiencies than the FOF. As for the drop size of both oxidizer and fuel, there was not a large difference between two injector types.

초 록

액체 산소와 탄화수소계 연료를 사용하는 로켓에서 삼중 충돌형(FOF, OFO) 인젝터가 흔히 사용된다. 일반적으로 FOF 형태가 OFO에 비해 낮은 성능을 보인다는 것이 알려져 있지만, 벽면 열전달에 있어서 보다 효율적인 방식이다. 한편, 산화제와 연료 분사구 직경 차이가 큰 FOF 형태에서 산화제 분사구가 분리된 분리 삼중 충돌형 FOOF 인젝터(이하 FOOF 인젝터)가 제안된 바 있다. 본 연구에서는 비반응 분무 실험을 통해 FOOF 인젝터의 분무 특성을 FOF와 비교하였다. PLLIF 기법을 이용하여 산화제와 연료의 질량 분포를 측정하였고, 순간사진을 이용하여 액적의 크기를 측정하였다. 실험 결과를 통해 FOOF 형태의 인젝터가 FOF에 비해 보다 안정적인 혼합 효율을 나타내며 액적 크기는 두 형태의 인젝터가 큰 차이 없이 비슷한 경향을 보임을 알 수 있었다.

Keyword : Mixture ratio(혼합비), FOF(삼중충돌형 인젝터), FOOF(분리 삼중충돌형 인젝터), Momentum ratio(운동량비), PLLIF(평면형광기법), Mixing efficiency(혼합효율)

Nomenclature

†2002년 11월 10일 접수 ~2003년 2월 9일 심사완료
* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부
** 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부
*** 중신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처: E-mail : ybyoon@plaza.snu.ac.kr
서울대학교 공과대학 기계항공공학부 301동 1301호

d : 분사공 직경
 G_f : 형광신호 강도
 I_i : 레이저 입사광의 강도
 V_z : 수직방향의 평균속도
 2θ : 충돌각
 ρ : 액체의 농도
 \dot{m}' : 질량 플럭스
 \dot{m} : 질량 유량

δA : 질량 분포 측정 단위 면적
 A : 분사공 단면적 MR : 운동량비
 E_m : 혼합 효율
Subscript
 o : oxidizer f : fuel

1. 서 론

충돌형 인젝터는 작동의 신뢰성과 높은 분사 유량으로 인해 액체 산소와 탄화 수소계 연료를 사용하는 액체 로켓에 많이 사용되고 있다. 특히 OFO (O: 산화제 분사공, F:연료 분사공) 삼중 충돌형 인젝터는 연소 안정성 및 성능이 매우 우수하다는 사실이 알려져 있다 [1~4]. 그러나 OFO 인젝터는 분무 바깥쪽에 산화제가 분포하므로 연소 실 벽면에 열전달 문제가 발생하는데 이러한 문제가 민감한 엔진의 경우에는 FOF 인젝터를 사용하기도 한다 [3~4]. 액체 산소와 케로신의 연소에서 최대 이론 연소 성능(I_{sp})을 보이는 산화제와 연료의 질량 혼합비는 23인데, 이를 만족시키기 위해서 FOF 인젝터는 산화제와 연료 분사공의 직경 비가 커야한다. 이는 분무 미립화 효율을 감소시킬 수 있는데, FOOF 인젝터는 FOF의 산화제 오리피스를 두 개로 나누어서 산화제와 연료의 직경 비를 낮출 수 있도록 하였다. Pavli [5]는 축소형의 엔진 실험을 통하여 OFO, FOOF, 한 쌍의 like-doublet (FF-CO)의 연소 성능을 비교하였는데, FOOF와 OFO 인젝터의 연소 성능은 비슷하였으나 like doublet 쌍의 경우 이보다 낮게 나타났다.

액체 로켓의 혼합 특성에 관련된 실험의 대부분은 서로 용해되지 않는 두 액체의 채집된 부피를 측정하는 기계적 분무 분류장치 (mechanical patternator)를 이용하여 왔다 [6~7]. 그러나 분사 속도가 증가하게 되면 장치와의 충돌에 의해 되튀기는 현상이 심해지고 이로 인해 분무를 교란시키므로 인젝터면 근방에서는 사용할 수 없고, 분무를 차단하는 셔터가 빠르게 움직이면서 셔터 위쪽에 고여있던 유량이 측정 영역으로 흘러들어가는 현상도 발생한다. 이러한 현상으로 인해 대부분의 혼합과정이 충돌점 근방에서 이루어지는 인젝터의 혼합 특성을 연구하는데 큰 단점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 단점을 극복하기 위하여 레이저를 이용한 계측 기법을 사용하고 있는데, McDonell은 unlike-doublet 인젝터의 혼합특성을

PLIIF기법을 이용하여 정성적으로 측정한 바 있다 [8].

본 연구에서는 PLIIF 기법을 이용하여 연료 및 산화제의 질량 분포를 측정하고 이로부터 혼합효율을 계산하여 FOOF와 FOF 인젝터의 혼합특성을 비교하였다. 또한 순간 사진을 이용하여 각 인젝터에서 형성되는 액적 크기를 측정하고 그 분포를 나타내었다.

2. 실험 방법

2.1 인젝터 설계

FOOF 인젝터는 Fig1 과 같이 일렬로 배열된 형태로서 중앙에 두 개의 산화제 분사공이 있고, 그 양 옆으로 연료의 분사공이 있다. 일반적인 충돌형 인젝터에서 충돌각이 60°일 때 최대의 혼합 효율을 나타내기 때문에 이 각도를 기준으로 설계하였고, 충돌각이 클 경우 충돌점이 벽면에 가까워지기 때문에 충돌각을 줄인 30, 45°에 대해서 동일한 실험을 수행하여 충돌각이 혼합 효율에 미치는 영향을 조사하였다. FOF 인젝터의 경우도 마찬가지로 30, 45, 60°의 분사각을 갖도록 설계하였다.

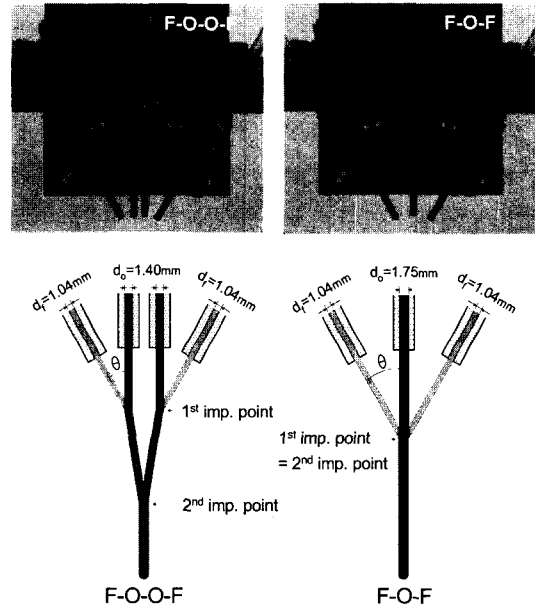


Fig. 1 FOOF 및 FOF 인젝터의 형상

한편, 인젝터의 설계 변수들을 표 1에, 그리고 실험 조건들을 표 2에 정리하였다.

2.2 질량 분포 측정

그림 2는 PLLIF을 이용한 분무분포 측정장치와 측정에 사용된 좌표축을 보여주고 있다. 광원으로는 Ar-ion 레이저 (LEXEL model 95)를 사용하였고, 488nm 파장에 형광신호를 나타내도록 물과 알콜을 부피비 4:1로 섞은 용액에 형광 염료(Aldrich F245-6, $C_{20}H_{22}O_6$)를 용해시켰다. 산화제의 질량분포 측정시에는 이 용액을 산화제 분사구로 분사하고 연료쪽에는 물을 사용하였다. 같은 방법으로 연료의 질량분포도 독립적으로 측정하였다. 형광 신호는 디지털 카메라(CANON, 12bit, 2160x 1440)에 기록이 되며, 550nm high-pass filter를 이용하여 산란 신호를 차단하였다.

표 1 인젝터 설계 변수

| Design Parameters | | FOOF | FOF |
|-------------------------------------|------|-------|-------|
| Orifice Dia. (mm) | Ox. | 1.40 | 1.75 |
| | Fuel | 1.04 | 1.04 |
| Ratio of orifice length to diameter | Ox. | 25 | 20 |
| | Fuel | 33.7 | 33.7 |
| Orifice Discharge Coefficient | Ox. | 0.606 | 0.577 |
| | Fuel | 0.566 | 0.566 |

표 2 실험 조건

| Experimental Conditions | FOOF | FOF |
|-----------------------------------|------------|------|
| Momentum ratio, MR | 0.5~6.5 | 1.75 |
| Ox. mass flow rate [g/s] | 15.0~54.2 | 1.04 |
| Fuel mass flow rate [g/s] | 16.0 | 20 |
| Impinging angle, 2θ [deg.] | 30, 45, 60 | |
| downstream location, Z [cm] | 1~8 | |

PLLIF 기법은 형광 염료가 균일하게 분포되어 있고 광흡수율이 높지 않은 경우, 레이저 평면상의 (x,y) 위치에서 카메라에 기록되는 G_f 는 ρ , I_i 에 비례한다는 가정에 근거하고 있다 [10].

$$G_f(x, y) = K I_i(x, y) \rho(x, y) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 그 위치를 대변하는 미소 체적에서 분무가 측정시간동안 존재하는 평균 농도를 의미한다. 또한 상수 K 는 일반적으로 측정이 불가능하기 때문에 결과적으로 식(1)의 형광신호로부터 분무의 상대 농도를 측정할 수 있다.

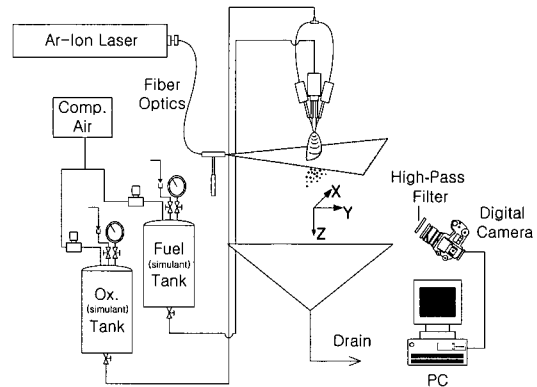


Fig. 2 PLLIF 측정을 위한 실험 장치 구성

한편 분무의 \dot{m}'' 는 임의의 (x,y) 위치에서 레이저 평면의 수직방향에 대한 속도 V_z 를 이용하여 다음과 같이 정량화 될 수 있다.

$$\dot{m}''(x, y) = \frac{V_z(x, y) G_f(x, y)}{\sum V_z(x, y) G_f(x, y)} \cdot \frac{\dot{m}_t}{\delta A} \quad (2)$$

충돌형 인젝터의 경우, 충돌점을 중심으로 하는 원호의 충돌파를 형성하고 이 충돌파로 액막이 액주로 분열되는 미립화 메커니즘을 갖는다. 이 과정에서 에너지의 소산 과정이 없기 때문에 분무의 이동 속도는 제트의 분사속도 (V_j)를 유지할 수 있다 [11]. 따라서 (x,y) 위치에서의 평균속도는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$V_z(x, y) = V_j \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (3)$$

여기서 z 는 충돌점에서 레이저 평면까지의 거리를 의미한다. 최종적으로 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 충돌형 인젝터의 분무 질량 플럭스를 정량적으로 구할 수 있다.

2.3 액적 크기 측정

액적의 크기는 연소 성능 및 안정성에 영향을 주기 때문에 액체 추진제를 사용하는 연료에서는 아주 중요한 변수이다 [1]. 또한 액체 산소와 케로신의 증발율이 매우 상이하므로 각각의 크기를 측정하여야 한다. Zajac 과 Michale [12], Nurick [13] 등은 FOF 분무의 액적 크기 측정을 위해 왁스와 물을 번갈아 사용하였지만 이 방법은 왁스의 점성이 실제 추진제에 비해 매우 크다는 한계가 있다.

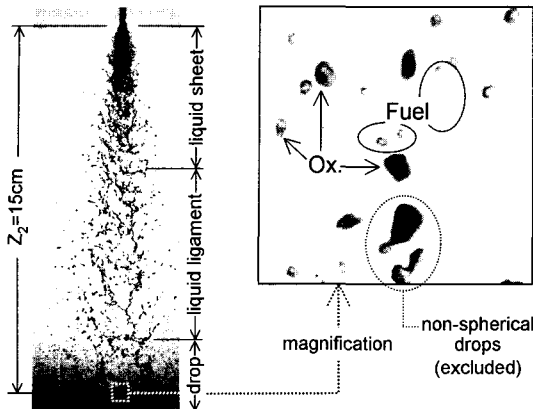


Fig. 3 액적 크기 측정 과정

본 연구에서는 그림 3에서와 같이 두 액적 크기의 측정을 위해 순간 사진 촬영법을 이용하였고 액체 산소의 모의 추진제인 물에 붉은 색의 수성 잉크를 첨가하여 케로신과 구분하였다. 본 사진 촬영법을 이용한 액적 크기의 측정은 10 μ m/pixel의 해상도를 가진다. 한편, 실험에 사용된 FOOF, FOF 분무의 미립화 성능이 좋지 않기 때문에 측정 위치를 2차 충돌 지점에서 15cm 하류로 정하였다.

3. 실험 결과

3.1 분무 특성

그림 3은 발광 시간이 4 μ s인 스트로보스코프를 이용하여 순간 촬영을 한 것인데, 그림에서와 같이 액막이 충돌 지점으로부터 상당히 먼 거리까지 유지되고 있다. 따라서 분무 액적의 크기 및 속도를 측정하여 질량 플럭스를 구하는 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 기법을 사용하기에 적합하지 않고, 유량이 중앙의 국소 영역에 집중되어 기계적인 분무 분류 장치를 이용할 때 특정 셀에서 역류 현상이 발생하기 쉽기 때문에 이 또한 적용이 힘들다.

한편, 분무 사진으로부터 분무 폭이 클수록 액막의 분열이 더 빨리 이루어지는 것을 알 수 있는데, 이는 액막이 넓게 퍼질수록 액막의 두께가 얇아지기 때문에 발생하는 현상이다. 따라서 분무 사진을 이용하여 액막의 분사각을 그림 4와 같이 측정하였다. 그림 4에서 FOOF와 FOF의 분무각이 큰 차이를 보임을 알 수 있는데, 이는 분열 메커니즘이 서로 다르기 때문이다.

즉, FOOF의 경우는 1차적으로 산화제와 연료 제트의 충돌에 의해 생성된 액막이 다시 2차적으로 충돌하여 분열이 이루어지는 반면, FOF는 세 방향에서 분사되는 제트가 한 점에서 집중되어 충돌하기 때문에 FOF의 경우가 동일한 운동량 비에서 보다 넓은 액막을 형성하여 분무각이 더 크게 된다.

그림 4에서 보면 두 인젝터 모두 운동량 비가 증가함에 따라 분무각이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 운동량 비가 증가할수록 중앙에서 분사되는 산화제의 유량이 측면의 연료의 유량보다 상대적으로 증가하여 충돌력이 감소하여 나타나는 현상으로 파악된다. 따라서 높은 운동량 비에서는 두 인젝터 모두 미립화 성능이 감소될 것으로 예상된다.

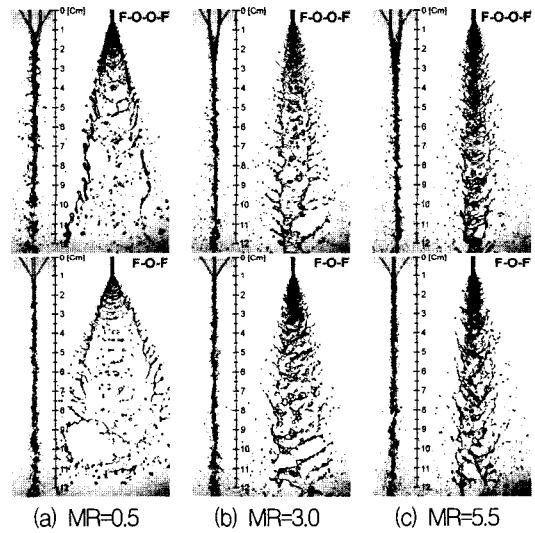


Fig. 4 운동량비에 따른 FOOF, FOF의 분무 사진

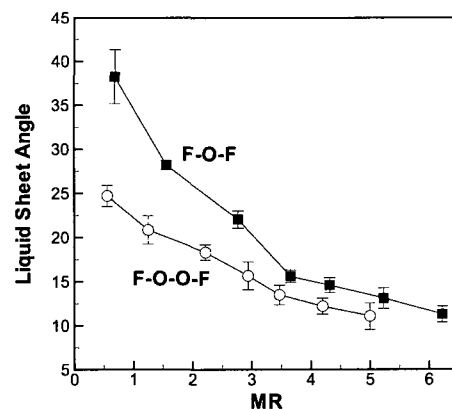


Fig. 5 운동량비에 따른 분무 각 변화

3.2 질량 분포 및 혼합효율

연료와 산화제의 질량 분포를 PLLIF 기법을 이용하여 측정하였다. 측정된 두 질량 분포로부터 다음과 같은 식을 이용하여 측정 평면에서 추진제의 혼합효율을 구하였다[6].

$$E_m = 1 - \frac{1}{\bar{m}_o} \left[\sum_0^n (\bar{m}_{o,i} + \bar{m}_{f,i})(R-r) \right] - \frac{1}{\bar{m}_f} \left[\sum_0^n (\bar{m}_{o,i} + \bar{m}_{f,i})(r-R) \right] \quad (4)$$

그림 6은 운동량 비에 따른 FOOF 및 FOF 인젝터의 혼합효율을 총돌점으로부터 5cm 후방에서 측정한 결과를 보여주고 있다. 그림으로부터 FOOF 인젝터의 혼합효율은 운동량 비에 따라 큰 변화 없이 일정한 값을 나타내고 있고, FOF의 경우는 0.5에서 아주 낮은 혼합효율을 보이고 이후에는 회복되어 증가하다가 3.5 이상에서 다시 감소하고 있음을 알 수 있다. Elverum와 Morey [7]는 FOF의 비반응 혼합효율 측정결과로부터 다음과 같은 최대 효율 조건을 제시한 바 있다.

$$\left(\frac{\bar{m}_f}{\bar{m}_o} \right)^2 \left(\frac{\rho_o}{\rho_f} \right) \left(\frac{A_o}{2A_f} \right)^{1.75} = 0.66 \quad (5)$$

이로부터 최적의 혼합효율을 갖는 운동량비는,

$$(MR)_{opt} = \frac{1}{0.66} \left(\frac{A_o}{2A_f} \right)^{0.75} \quad (6)$$

이다. 위 식으로부터 본 실험에서 설계된 FOF 인젝터는 운동량 비 3.3에서 최대의 혼합효율을 나타내는데, 이는 PLLIF 측정 결과로부터 얻은 FOF 결과와 일치한다(그림 6).

한편, 총돌각 및 측정위치에 따른 혼합효율의 변화를 그림 7에서와 같이 측정하였는데, FOOF 인젝터는 역시 총돌각이나 측정위치에 따라 거의 변화가 없는 안정적인 혼합효율을 보이고 있다. 반면 FOF의 경우는 하류 쪽으로 가면서 혼합효율이 감소하는데 특히 총돌각이 클 때에 이러한 현상이 두드러진다. 이는 FOOF의 경우, 대부분의 혼합과정이 1차 총돌위치에서 형성되고 이 혼합된 추진제는 2차 총돌에 크게 변화하지 않기 때문에 안정적인 혼합효율을 유지하지만 FOF의 경우는 FOOF에 비해 연료제트가 산화제 제트에 큰 충돌력을 갖고 혼합을 이루기 때문에 이 과정에서 연료제트가 바깥방향으로 반사

되어 나가기 때문에 판단된다.

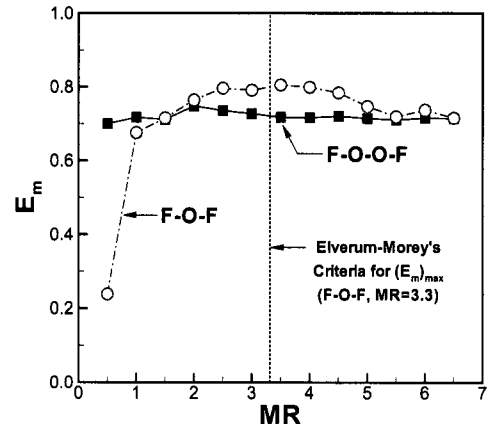


Fig. 6 운동량비에 따른 인젝터 Em 변화 (Z=5cm)

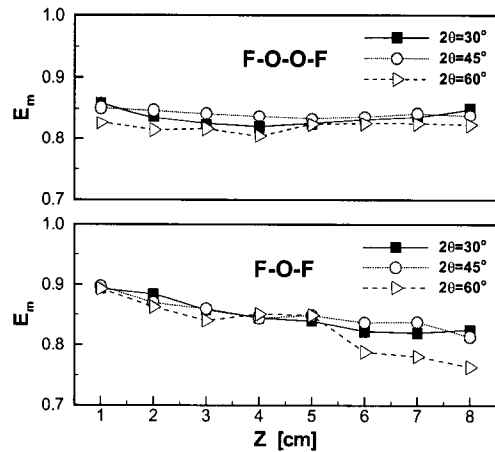


Fig. 7 총돌각, 측정위치에 따른 Em 변화 (MR=3.0)

3.3 액적 크기 분포

그림 8은 연료와 산화제 각각의 액적 크기를 FOOF 및 FOF에 대하여 비교한 결과이다. 이때 운동량비는 3.0 이었고 총돌점에서 15cm 후방에서 측정하였다. 측정 결과로부터 x=2cm의 경우를 제외하면 두 인젝터의 액적 크기가 거의 동일하다는 사실을 알 수 있다. 이는 산화제와 연료의 분사공의 직경비가 작은 FOOF 인젝터의 경우가 FOF 보다 미립화 성능이 우수할 것이라는 예상과는 상반된 결과이다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 FOOF의 경우 액막의 충돌인 2차 충돌이 상대적으로 약하여 미립화에 큰 영향을 주지 못하기 때문이다.

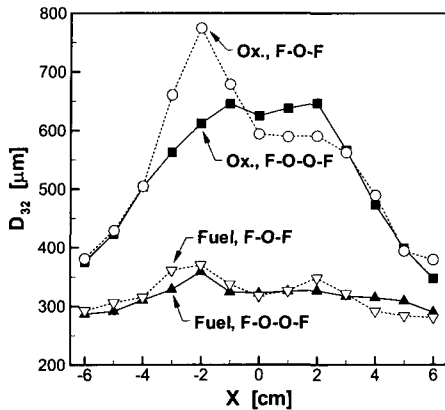


Fig. 8 액적의 크기 분포 (MP=3.0, Z=15cm)

4. 결 론

PLLIF 기법과 순간 사진을 이용하여 FOOF, FOF 인젝터의 분무특성을 비교한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. FOOF 및 FOF 인젝터는 운동량 비가 증가함에 따라 중앙에서 분사되는 산화제 제트를 측면의 연료 제트가 효과적으로 분열시키지 못하기 때문에 분무각이 줄어든다. 또한 FOOF의 2차 충돌은 액막의 충돌로 이루어지며 이는 상대적으로 충돌력이 약하기 때문에 분무각이 FOF에 비하여 작게 나타난다.
2. FOOF의 혼합효율은 운동량 비의 변화에도 안정적인 값을 보여주고 있는 반면, FOF는 산화제와 연료의 운동량 비가 1보다 작을 때 급격한 감소를 보인다. 충돌 각 또는 측정 위치에 따른 혼합효율의 변화도 이와 마찬가지로 FOOF는 매우 안정적인 특성을 나타내는데 반해, FOF는 하류에서 혼합 효율이 감소되며 이는 충돌각이 커질수록 두드러진다.
3. 산화제와 연료의 액적 크기 분포는 FOOF, FOF 모두 유사한 결과를 보인다. FOOF 인젝터의 경우, 산화제의 직경이 FOF 보다 작아서 보다 작은 액적을 형성할 수 있으나, 2차 충돌인 액막의 충돌이 약하기 때문에 FOF와 비슷한 크기를 갖는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (M1-

0104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) D.T.Harje et al, "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability", NASA SP-194, 1995
- 2) J.PiePer et al, "Performance and Stability Characterization of Liquid Oxygen/Kerosene Injectors at Aerojet", Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, AIAA, 1995
- 3) G.S.Gill and W.H.Nurick, "Liquid Rocket Engine Injectors", NASA SP-8089, 1976
- 4) A.Ferrenberg et al, "Atomization and Mixing Study", NASA CR 178751, 1985
- 5) A.J.Ravli, "Design and Evaluation of High Performance Rocket Engine Injectors for Use with Hydrocarbon Fuels", NASA TM 79319, 1979
- 6) J.H.Rupe, "A Correlation between the Dynamic Properties of a Pair of Impinging Streams and the Uniform of Mixture-Ratio Distribution in the Resulting Spray", JPL 20-209, 1956
- 7) G.W.Elverum and T.F.Morey, "Criteria for Optimum Mixture-Ratio Distribution Using Several Types of Impinging-Stream Injector Elements", JPL 30-5, 1959
- 8) V.McDonell, V.Phi, and S.Samuelsen, "Structure of Sprays Generated by Single Unlike Doublet Injectors", JPC 99-2464, 1999
- 9) D.Talley et al, "Accounting for Laser Sheet Extinction in Applying PLLIF to Sparys", JPC 96-0469, 1996
- 10) V.McDonell and S.Samuelsen, "Assessment of Liquid Fuel Distribution in Sprays using Planar Imaging Methods", Preceeding of the 1st Asia-Pacific Conference on Combustion 30-33, 1997
- 11) W.E.Anderson et al, "Impinging Jet Injector Atomization", Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, AIAA, 1990
- 12) L.Zajac, "Correlation of Spray Drop Size Distribution and Injector Variables" NASA 7-726, 1971
- 13) R.McHale et al, "Nonlinear Orifice Holes and Advanced Fabrication Techniques for Liquid Rocket Injectos", CR R 9271, 1974