

F-O-O-F 인젝터의 혼합 특성

임병직* · 정기훈** · 윤영빈***

The mixing characteristics of Unlike Split Triplet (F-O-O-F) Impinging-Jet Injector Elements.

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

Keywords : Unlike split triplet(F-O-O-F), Mixing efficiency, Mechanical patternator, Optical patternator, PLLIF

Abstract

The mixing of fuel and oxidizer and each mass distribution of unlike split triplet(F-O-O-F) injector for liquid rocket, which are known to affect the combustion efficiency significantly, has been investigated using PLLIF technique. Experiment is conducted to investigate the effect of mixture ratio(MiR), momentum ratio(MoR) and impinging angle on mixing efficiency. The mixing efficiency, which is introduced by Rupe, gives the global characteristic of spray mixing. Experiment for comparison with triplet injector(F-O-F), which has same momentum ratio and impinging angle with split triplet injector is conducted.

1. 서론

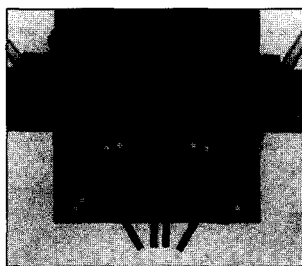
로켓에 사용되는 연료는 일반 항공기와는 달리 대기에서 공급되는 산화제(O₂)를 이용한 연소를 통해서 고도에 따라 원하는 추력을 얻을 수 없기 때문에 자체 산화제와 연료를 같이 포함하고 있게 되고 이로 인해 액체 연료의 분사 과정에서 원하는 미립화와 혼합의 특성을 얻기 위해 인젝터의 형상에 따른 각각의 특성에 대한 많은 연구가 진행되었다. 현재까지 많이 사용되고 있는 인젝터의 형태는 충돌형과 비충돌형으로 나뉘어진다. 일반적으로 충돌형의 경우는 구조가 간단하고 제작이 용이한 반면 연소시에 현상 불안정이 문제가 되고 있고, 비충돌형의 경우에 많이 사용되고 있는 스윙 동축형 인젝터의 경우에는 충돌형 인젝터와 같은 불안정성 현상이 적지만 설계 과정이 복잡하고 제작 역시 복잡한 특성을 가지고 있다. 본 연구에 사용된 인젝터는 충돌형 인젝터로 충돌형 인젝터에 대한 연구는 기본적인 충돌 분무에 대한 연구에서부터 실제 인젝터에 영향을 주는 요인까지 그 동안 많은 연구 결과와 논문을 통해 잘 알려져 있다[1].

본 실험에서 사용되는 인젝터는 연료와 산화제 제트가 직접 충돌하여 미립화와 혼합이 이루어지는 unlike의 경우에 해당하게 되는데, <그림 1>에서와 같이 unlike doublet 인젝터 두 쌍이 하나의 기본 인젝터가 되는 형태이다.

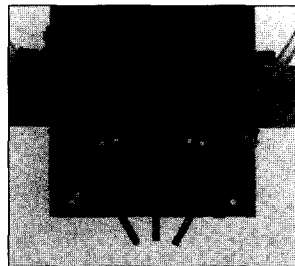
Unlike doublet 인젝터의 일반적인 특성에 대해서는 Jake H. Rupe에 의해 광범위한 연구가 이루어졌고, 기계적인 분무 분류 장치(Mechanical patternator)를 이용하여 분무장을 측정하여 혼합 특성을 수치화 할 수 있는 혼합 효율도 제안 되었다. 또한 Rupe는 unlike doublet 인젝터에서 최대 효율을 얻기 위한 인젝터의 형상 변수와 추진제 물성치의 관계식도 실험적인 방법을 통해 제안 하였다[2][3].

Split triplet 인젝터(FOOF)와 Triplet 인젝터(FOF), like doublet에 대한 탄화수소계 연료의 연소 실험을 통하여 Priem과 Heidmann의 기화 모델이 잘 맞음을 보였다[4]. 단일 split triplet 인젝터의 분무에 의한 미립화 특성과 혼합 특성에 대한 연구가 진행되었고, 분사공의 지름비에 따른 혼합 특성에 대한 연구도 이루어졌다. 또한 두 쌍의 Split triplet 인젝터에 의한 교차 영역에서의 분무 특성에 대한 연구도 진행되었다[5]~[7]. 본 실험에서는 기존의 연구들에서 사용되었던 기계적 분무 분류 장치가 아닌 PLLIF (Planar Liquid Laser - Induced Fluorescence) 기법을 이용하여 실험을 수행하였다. 기존의 기계적 분무 분류 장치는 측정을 위해 분무장에 직접 장치를 설치해야 하기 때문에 분무장을 교란 시킬수 있고, 근접된 거리에서의 측정이 불가능하고 측정된 결과들의 공간 분해능도 많이 떨어지면서 측정 시간 역시 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 방법으로 레이저를 이용한 측정 방법인 PLLIF을 이용하였다[8][9].

PLLIF 기법을 이용하여 분무의 단면을 측정하였고, 충돌 각도와 운동량비에 따른 분무장의 변화에 대한 실험을 수행하였고, 충돌 후 거리에 따라 분무의 혼합이 어떻게 변하는지도 측정하였다. 본 실험에서는 PDPA를 이용한 액체의 지름 측정이 불가능하기 때문에 사진 촬영을 통한 분무의 특성을 나타



<Split Triplet type>



<Triplet Type>

<그림 1> Injector assembly

* 서울대학교 기계항공공학부, tachyon0@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부, jkihoon@snu.ac.kr

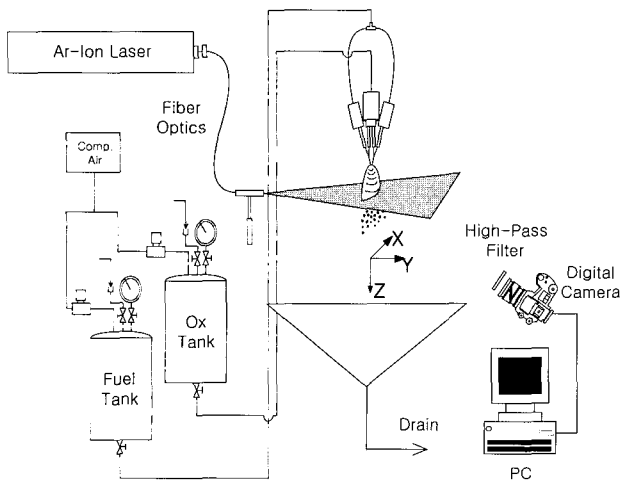
*** 서울대학교 기계항공공학부, ybyoon@plaza.snu.ac.kr

내었다. 또한 본 실험에 사용된 분리 삼중 충돌형(Split triplet, FOF) 인젝터와 비슷한 형상의 삼중 충돌형(Triplet) 인젝터 역시 <그림 1>과 같이 설치하여 비교 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 PLLIF(Planar Laser-Induced Fluorescence)

앞에서 언급한 것과 같은 기계적인 방법의 문제점을 극복하기 위해 고안된 방법으로 기본적인 이론과 적용 예에 대해서는 [8],[9]에 잘 나와있다. 실험 장치의 구성은 <그림 2>와 같다. 실험에 사용된 레이저는 Ar-Ion 레이저인데, Ar-Ion 레이저의 대표 파장인 488 nm, 514,5 nm 중에서 보다 청색쪽에 가까운 파장을 선택하였고, 이것은 digital camera에 사용된 550nm high pass filter를 이용하여 측정되는 산란에 의한 신호를 최대한 줄이기 위한 것이다. 488nm 파장을 이용한 실험을 위해 형광 염료를 첨가하지 않은 분무 상태의 실험을 하였고, 촬영된 이미지에서 형광 신호 또는 산란 신호가 잡히지 않는 것을 검증하였다.



<그림 2> Experimental Diagram

모의 추진제로 사용하는 것이 물이기 때문에 형광 염료(Aldrich F245-6, $C_{20}H_{12}O_5$)가 용해되지 않아 염료의 용해를 위해 물과 알코올을 4:1로 섞은 용액을 사용하게 되고 이 용액에 30mg/l의 형광 염료를 첨가하여 실험한다.

실험에서 촬영된 이미지는 레이저를 sheet beam의 형태로 만들고 분사면과 일정 각도에서 촬영을 하였기 때문에 sheet beam의 profile에 따른 보정이 필요하고 각도를 가지고 촬영된 이미지를 평면으로 변환하여 주는 과정이 필요하게 된다. 이러한 이미지 변환 과정에서 전후의 차이를 <그림 3>과 <그림 4>에 나타내었다.



(a) Before calibration (b) After Calibration
<그림 3> Sheet Beam Calibration



(a) Before Transform (b) After Transform

<그림 4> Affine Transform

측정된 형광 신호가 형광 분자의 농도에 비례하는 것을 이용하여 전체 형광 신호의 합과 처음 분사된 유량을 이용하여 각 이미지 셀에 단위 시간당 흘러간 mass를 측정할 수 있다.

이미지 측정을 위해 사진기의 노출 시간을 0.25초로 하여 측정하였다. 그리고 기본적인 분무의 특징을 촬영하기 위해 stroboscope를 10Hz의 주파수로 가동하고 카메라 노출 시간을 0,1초로 한 순간 촬영 기법을 이용하여 간접 촬영을 하였다.

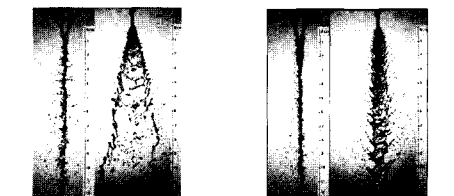
2.2 인젝터

인젝터는 앞의 <그림 1>에서 처럼 오리피스 형태로 제작하였고, split-triplet 인젝터와 triplet 인젝터에서 산화제 분사 오리피스의 지름만 변화를 주었다. 산화제 오리피스의 교체를 위해 산화제 챔버와 오리피스를 쪼갤 수 있는 플러그를 별도 제작하여 교체 작업이 용이하도록 하였다. 본 실험에서는 split triplet 인젝터의 경우에는 1.397mm, triplet 인젝터에는 1.753mm의 산화제 오리피스 지름(내경)을 사용하였고 두 종류의 인젝터 모두 연료 측 오리피스에는 1.041mm의 오리피스를 사용하였다. 모든 오리피스에서 L/d를 20 이상으로 하여 오리피스 내부에서 발생하는 현상으로 인해 혼잡에 영향을 주지 않을 수 있도록 하였다[10]. 그리고 인젝터 고정판을 이용하여 인젝터의 충돌각의 변화가 가능하도록 하였다. 본 실험에서는 30°, 45°, 60°의 각도 변화를 주어 실험하였다.

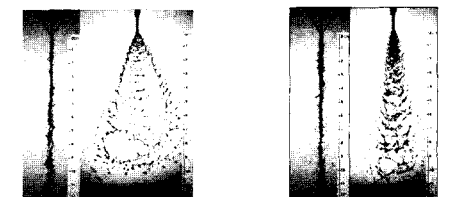
3. 실험 결과

3.1 분무 형상

<그림 5>, <그림 6>에서 간접 촬영 기법을 이용한 기본적인 split triplet과 triplet의 분무 형상을 사진을 통해 확인 할 수 있다. 사진에서 보는 바와 같이 두 인젝터 모두 충돌후 축방향의 흐름을 가짐을 알 수 있다.



<Momen. Ratio=1.0> <Momen. Ratio=3.0>
<그림 5> Split Triplet Spray



<Momen. Ratio=1.0> <Momen. Ratio=3.0>
<그림 6> Triplet Spray

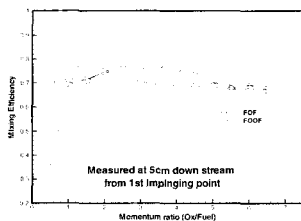
분무 형상에서 보이는 충돌 지점에서 split triplet 인젝터의 경우는 1차 충돌 지점은 인젝터의 형상에 의해 결정이 되지만, 2차 충돌 지점은 분사되는 산화제와 연료의 운동량 비에 의해 결정된다.

3.2 혼합 특성

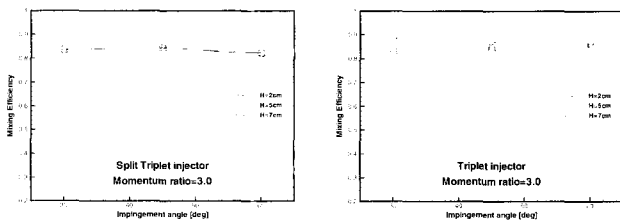
혼합의 특성은 연소 현상을 특징 지을수 있는 중요한 사항으로서 로켓 엔진 인젝터에 대해 혼합 특성을 수치적으로 표시할 수 있는 혼합 효율이라는 값이 Rupe에 의해 제안이 되었고 지금까지 혼합 특성을 설명하는 가장 적절한 값으로 활용되고 있다. Rupe가 제안한 혼합 효율은 전체 분무장을 살렸을 때 초기에 설계한 혼합비(Mixture ratio)에서 얼마나 그 혼합비를 이루었는지를 나타내 주는 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$E_m = 1 - \left[\frac{\sum_o \dot{m}_i (R - r)}{\dot{M}_i \cdot R} - \frac{\sum_o \dot{m}_i (R - \bar{r})}{\dot{M}_i \cdot (R - 1)} \right] \quad (1)$$

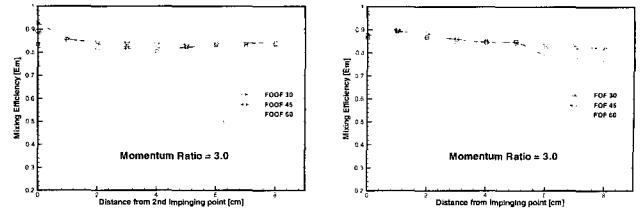
위의 식을 이용하여 각각의 경우에 대한 혼합효율을 계산한 결과가 <그림 7>, <그림 8>, <그림 9>에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 split triplet의 혼합 효율은 운동량비, 충돌각에 의해 거의 변화가 없고 충돌 후 하류로 내려감에 따라서도 거의 일정한 값을 보인다. 조금씩 감소하는 경향을 보이긴 하지만 그다지 현저한 경향성을 보이지 않는다. 이것은 혼합 효율이 좋은 것으로 알려진 unlike doublet의 형태로 1차 충돌이 발생하고 이렇게 해서 1차 혼합이 이루어지고, 이렇게 해서 생성된 액막에 의해 2차 충돌 과정이 일어나기 때문에 짧은 영역에서 혼합이 잘 이루어지는 것으로 판단된다. 그리고 triplet의 경우도 운동량비가 0.5인 경우를 제외하고는 약간의 증감은 보이지만 운동량비에 따라 거의 일정한 수준을 유지하고 있고, 충돌각에 따른 값의 변화 역시 split triplet보다는 증감을 가지지만 역시 거의 일정한 수준을 유지하고 있다. 이것은 Rocketdyne(1985)의 실험 결과와 일치한다[11]. 또한 하류로 감에 따라 혼합 효율이 감소하는 결과는 산화제와 연료 제트의 충돌 후 측정 평면과 평행한 속도 성분의 차이로 인해 발생하는 것으로 추정되지만 이것 역시 현저한 감소를 보이지는 않는다.



<그림 7> Effect of Momentum Ratio on E_m



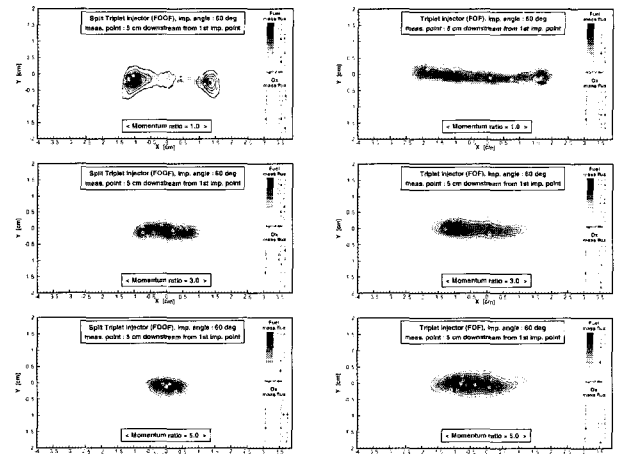
<그림 8> Effect of Impinging Angle On E_m



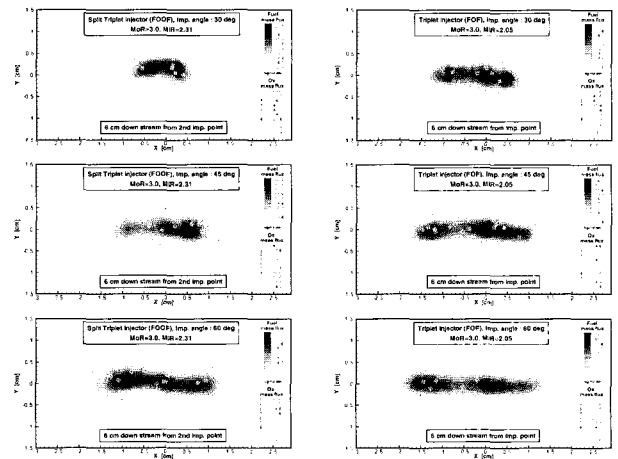
<그림 9> Variation of E_m along down stream

3.3 질량 플럭스 분포

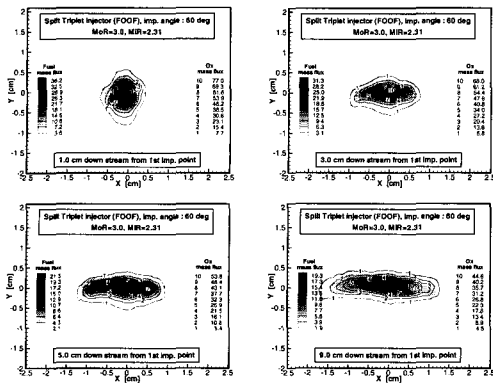
PLLIF 통해 분무를 촬영하게 됨으로 인해 카메라의 셔터가 열려있는 일정 시간 동안의 질량을 측정하게 되므로 측정되는 것은 질량 플럭스이다. 이것은 지금까지 많이 사용되어온 Mechanical patternator와 같은 개념의 접근이다. 하지만 Rupe의 경우는 채집판을 분무에 의해 생기는 액주의 형상처럼 곡률을 가지도록 제작하여 액주상의 속도 분포는 동일한 것으로 가정하여 채집된 유량으로 혼합 효율을 구하였고[2], Ferrenberg는 평행한 면의 채집판을 통하여 분무를 채집하고 그를 이용해 혼합 효율을 계산하였다[11]. 본 실험에서는 레이저 sheet beam을 이용하기 때문에 분무의 한 단면을 측정하는 것이된다. 분무의 형상에 대해서 운동량비에 따른 차이점, 충돌 각도에 의한 차이점, 그리고 충돌 지점 부터의 down stream 위치에 따른 차이점 등을 나타내었다.



<그림 10> Effect of Momentum ratio on Mass flux distribution



<그림 11> Effect of Impinging angle on Mass flux distribution



<그림 12> Mass flux distribution along the downstream.

<그림 10>에서 보면 전체적으로 split triplet의 경우에 비해 triplet의 경우가 얇고 넓게 퍼지는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적인 충돌 지점이 하나인 대칭형 인젝터의 특성으로 파악된다. 하지만 두 경우 모두 산화제의 운동량이 증가함에 따라 제트분사 면(Y축)과 같은 방향으로 확장되고 반대로 수직인 평면(X축)으로는 줄어든다. 이것은 양쪽에서 밀고 들어오는 연료의 운동량이 상대적으로 줄어들면서 산화제를 밀어낼 힘이 줄어들기 때문이다. <그림 11>에 나타나 있는 각도의 영향에서도 마찬가지로 충돌각이 증가하면서 충돌에 의한 분무를 제트분사면으로 밀어내는 힘이 커지게 되므로 X축 방향으로 분무 영역이 더 커지게 된다.

<그림 12>는 동일 운동량비(3.0)와 충돌각(60 deg)에서 충돌 이후 하류에서의 질량 플럭스 분포를 나타내 준 것으로 하류로 가면서 영역이 확장 되기는 하지만 유량의 집중 현상은 개선되지 않음을 알 수 있다. 즉 중앙의 산화제 제트가 대칭형의 성질 그대로를 유지하면서 그리고 연료로부터 충분한 운동량을 전달 받지 못함으로써 좌우로 퍼지지 못하고 한곳에 집중되어 나타난다. 하지만 앞의 혼합 효율에서 살펴본 바와 같이 전체적인 혼합 효율의 현저한 감소 현상은 나타나지 않는다.

4. 결 론

물을 모의 추진제로 사용하여 PLIFF 기법을 이용한 본 실험에서 혼합 효율과 질량 플럭스의 변화를 충돌각, 운동량비, 측정 높이 등을 변화 시키면서 확인하여 보았다.

1. Triplet 인젝터와 split triplet 인젝터 모두 분사 조건(충돌각, 운동량)에 따른 혼합 효율의 변화가 거의 없음을 알 수 있었고, 충돌 후의 위치에 따른 변화도 약간 감소하는 경향을 보이지만 그다지 큰 효과를 보이지는 못한다.

2. 질량 플럭스에서는 운동량 비가 감소할수록 충돌 각이

증가할수록 질량의 집중 현상이 감소하고 분무가 공간적으로 확산되는 것을 알 수 있었고, 산화제의 운동량이 증가하여 운동량비가 증가하면 질량이 중앙에 집중되는 현상이 현저하게 드러나지만 앞의 결과에서 보듯이 혼합 효율 자체는 큰 변화가 없다.

5. 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(MI-0104-00-0058)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] NASA Center for Aerospace Information(CASI), Liquid Rocket Engine Injectors, NASA SP-8089,
- [2] Jake H. Rupe, The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Streams, JPL Progress Report, No. 20-195
- [3] Jake H. Rupe, A Correlation Between the Dynamic Properties of a Pair of Impinging Streams and the Uniformity of Mixture-ratio Distribution in the Resulting Spray, JPL Progress Report, No. 20-209
- [4] A.J.Pavli, Design and Evaluation of high performance Rocket Engine Injectors for Use with Hydrocarbon Fuels, NASA TM 79319
- [5] Kang, S.J., Rho, B.J., Oh, J.H. and Kwon, K.C., Atomization Characteristics of a Double Impinging F-O-O-F type Injector with Four Streams for Liquid Rockets, KESM international Journal, Vol.14, No.4, pp466-476
- [6] Y.H Cho, S.W Lee, W.S Yoon and Y.S Kim, Effect of Orifice Diameter Ratio on the Mixing Characteristics of Unlike Impinging Injectors, AIAA2002-0343
- [7] E.S Lee, K.C Kwon, S.J Kang, K.W Rhu and B.J Rho, Twin spray Characteristics between Two Impinging F-O-O-F Type Injectors, ILASS-Asia 2001, pp.106-111
- [8] D.G.Talley, A.T.S.Thamban, V.G.McDonell, G.S.Samuelsen, Laser sheet Visualization of Spray Structure, AIAA, V.171
- [9] 이경진, 정기훈, 윤영빈, 정경석, 정인석, An Experimental Study of Measurement of Spray Distribution using PLLIF(Planar Liquid Laser-Induced Fluorescence), 추계 항공우주학회 학술 발표회 논문집, pp. 168~172
- [10] Robert W. Riebling, Effect of Orifice Length to Diameter Ratio on Mixing in the Spray from a Pair of Unlike Impinging Jets, J. Spacecraft and Rocket, Vol.7, pp. 894-896
- [11] A. Ferrenberg, K. Hunt, J. Duesberg, Atomization and Mixing Study, Rockwell International