

충돌형(F-O-F, O-F-O) 실물형 분사기의 분무특성 및 혼합특성에 관한 연구

김종규* · 김승한* · 문일윤* · 이광진* · 서성현* · 한영민*

A Study on Spray and Mixing Characteristics of Unlike Impinging Triplet Injector (F-O-F, O-F-O)

Jong-Gyu Kim* · Seung-Han Kim* · Il-Yoon Moon*
Kwang-Jin Lee* · Seong-Hyeon Seo* · Yeoung-Min Han*

ABSTRACT

Spray and Mixing characteristics of the unlike impinging triplet injectors (F-O-F, O-F-O) were investigated with the variation of the momentum ratio of oxidizer to fuel. The spray pattern was measured using a backlit stroboscopic photography technique, and mixing efficiency was measured using a mechanical patternator. Kerosene/water were used as a propellant simulant. From the experimental results, it is found that a O-F-O type injector has a good atomization. And as the momentum ratio increases, the mixing efficiency decreases rapidly.

초 록

실물형 Unlike 충돌형 triplet 분사기인 F-O-F형과 O-F-O형의 분무특성 및 혼합특성을 실험적으로 알아보았다. 각각의 분사기에 대해 산화제와 연료의 운동량비의 변화에 따라 분무형상과 케로신/물을 이용한 혼합효율을 측정하였다. 분무형상은 Stroboscope와 CCD camera를 이용한 직접사진기법으로, 혼합효율은 Mechanical Patternator를 이용하였다. O-F-O형 분사기가 미립화 특성이 우수함을 알 수 있었고, 운동량비가 증가함에 따라 혼합효율이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

Key Words : Unlike impinging triplet injector, breakup length, mass distribution, Mixing efficiency

1. 서 론

로켓엔진에 장착되는 분사기는 성능과 연소 안정성 측면에서 매우 중요한 핵심부품이다. 국외의 로켓엔진 선진국에서는 지난 수십 년간 로

켓엔진을 개발하면서 수십 종의 분사기에 대한 설계 및 성능평가 데이터베이스를 확보한 상황이다. 국내에서는 로켓엔진의 개발 초기단계로서 실물형 분사기에 대한 자료구축이 제한적이다. 지금까지 국내에서 로켓엔진용 분사기에 대

*엔진그룹, 한국항공우주연구원(Rocket Engine Department, Korea Aerospace Research Institute)

한 연구는 주로 충돌형 분사기에 대한 특성 파악으로 한정되어 왔으나, 안정적인 고성능 엔진 개발을 위해서는 다양한 형태의 충돌형 분사기 및 동축형 분사기를 선정, 각 분사기의 효율과 안정성을 상대 평가하여 최적 분사기를 선정할 필요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 액체로켓엔진에 많이 사용하는 충돌형 unlike triplet 분사기(F-O-F, O-F-O)에 대해 고찰하였다. 일반적으로 안전성 및 성능면에서는 O-F-O형이 우수하지만 벽면 열전달에 있어서는 F-O-F형이 보다 효율적임이 알려져 있다.[1] 각 분사기의 분무특성과 혼합특성을 운동량비의 변화에 따라 고찰하였다.

2 본 론

2.1 분사기 사양

본 연구에서 고찰된 분사기는 1) F-O-F unlike triplet 분사기, 2) O-F-O unlike triplet 분사기이다. 각 분사기에 대한 사양을 table 1에 제시하였다.

Table 1. 충돌형 분사기의 종류와 사양

	F-O-F	O-F-O
산화제 노즐 직경, d_o	3.0 mm	2.2 mm
연료 노즐 직경, d_f	1.5 mm	2.2 mm
충돌각 (2θ)	60	60
충돌길이	15.6 mm	10.4 mm

2.2 분사기 성능시험장치 및 평가 기법

2.2.1 상압수류시험장치

분사기의 분무특성과 이에 대한 각종 평가기법의 타당성을 파악하기 위해 설치한 이원 추진제(bi-propellant)상압 수류시험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2.2 Mechanical Patterner

본 연구에 사용한 패터네이터는 채집부가 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ 의 사각관 300개(20×15)를 간격이 없

도록 묶어서 제작한 사각관 다발방식으로써 많은 유량이 분무될 시에도 채집관에서 넘치는 오차 발생 요인을 최소화 하였다. 채집부의 크기는 $16\text{cm} \times 12\text{cm}$ 이다.

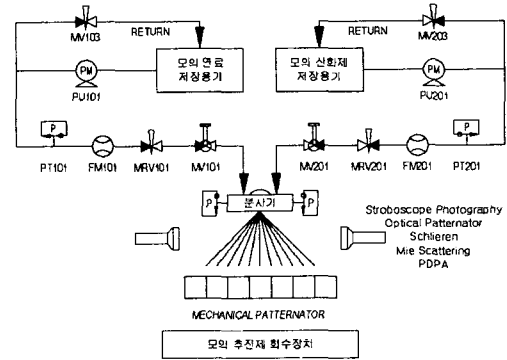


Fig 1. 이원 추진제 상압 수류시험 장치 개략도

2.2.3 분무 가시화

본 연구에서 구현한 분무 가시화 및 형상 측정 기법은 stroboscope를 이용한 직접 사진 기법과 레이저의 직진성을 이용한 attenuation 측정 기법이다. 본 시험에 사용한 CCD camera는 내부적으로 stroboscope 구동을 위한 TTL pulse가 발생되어 카메라의 노출시기와 stroboscope에서 발생하는 노출광을 동기화 시켰다.

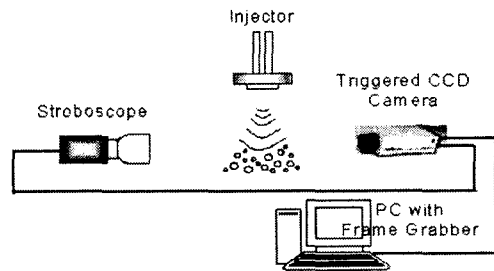


Fig. 2 직접사진기법

Laser attenuation 계측 기법은 레이저 광이 분무 영역을 투과할 시에 액막이나 액적에 부딪혀서 진행방향으로의 레이저 광의 세기가 줄어드는 점을 이용한 기법으로 분무의 breakup length, breakup frequency, 그리고 spray angle를 측정할 수 있다.

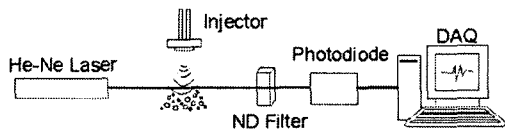


Fig. 3 레이저 감쇠 측정 기법 개략도

2.3 시험조건

본 연구에서 고찰한 분사기의 추진제 유량은 총돌형의 경우 분사기 개수가 11개의 분사기로 이루어진 축소형 연소기의 유량을 기준으로 단위 분사기당의 유량을 결정하였다. Table 2에 단위 분사기당 산화제와 연료의 유량을 나타내었다.

Table 2. 단위분사기당 산화제 및 연료 질유량

	총질량 유량	산화제 질량유량	연료 질량유량	O/F 비
축소형 연소기	2.872 kg/s	2.012	0.860	2.340
총돌형 (11ea)	0.261	0.183	0.078	분사기당 유량

Table 3. 총돌형 분사기 물-Kerosene 수류시험조건

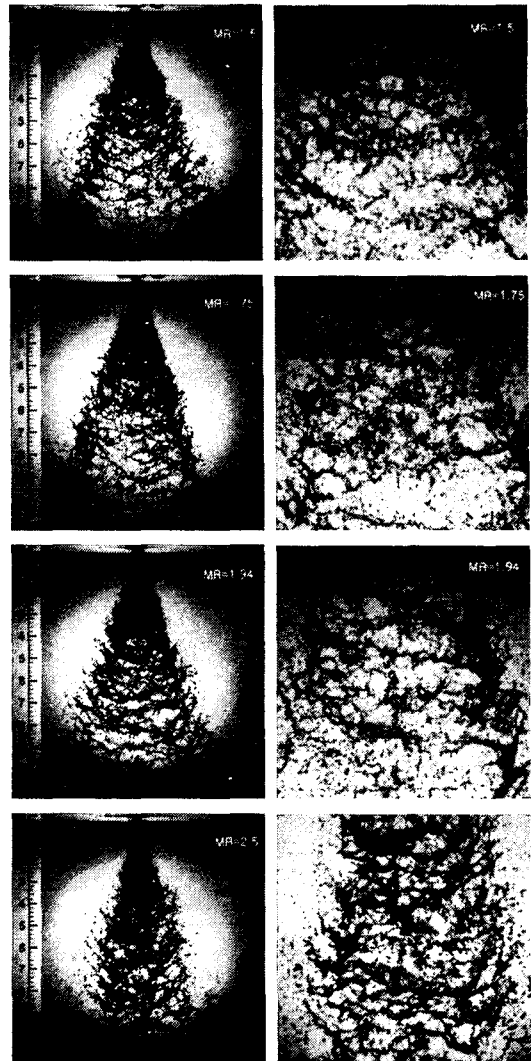
분사기	운동량비	실유체 O/F Ratio	질량 유량 [l/min]		분사속도 [m/sec]		속도비
			산화제	연료	산화제	연료	
F O F	1.50	2.058	9.97	6.46	23.51	30.45	0.77
	1.75	2.223	10.22	6.13	24.09	28.90	0.83
	1.94	2.341	10.38	5.91	24.48	27.88	0.88
	2.50	2.657	10.76	5.40	25.38	25.47	1.00
	3.00	2.911	11.03	5.05	26.00	23.82	1.09
O F O	1.00	1.680	9.29	7.37	20.36	32.30	0.63
	1.50	2.058	9.97	6.46	21.86	28.32	0.77
	1.75	2.223	10.22	6.13	22.40	26.87	0.83
	1.94	2.34	10.38	5.91	22.76	25.92	0.88
	2.50	2.657	10.76	5.40	23.60	23.68	1.00
	3.00	2.911	11.03	5.05	24.17	22.14	1.09
	4.00	3.361	11.42	4.53	25.03	19.86	1.26
5.00	3.758	11.70	4.15	25.65	18.20	1.41	

시험 조건은 운동량비 상사조건을 이용하여 실유체와 모의 유체의 운동량비가 동일하게 되도록 연료유량을 실유체일 때의 유량과 같게 고정시킨 상태에서 실유체의 혼합비에서 환산된 모의유체의 혼합비에 맞도록 산화제 유량을 설정하였다. (Table 3 참고)

2.4 시험결과

2.4.1 분무특성

Fig. 4에 F-O-F 형 분사기의 분무 사진을 운동량비 1.5, 1.75, 1.94, 2.5, 3.0에 대해 나타내었다.



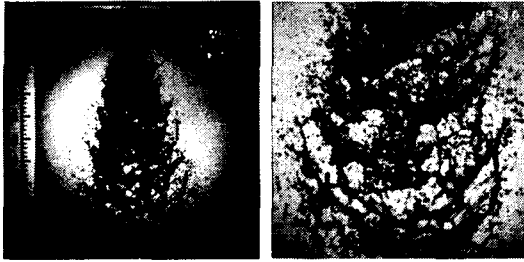
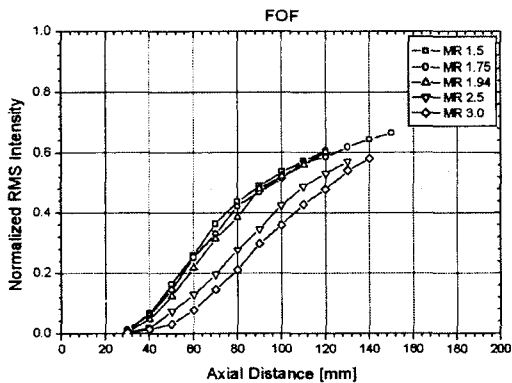
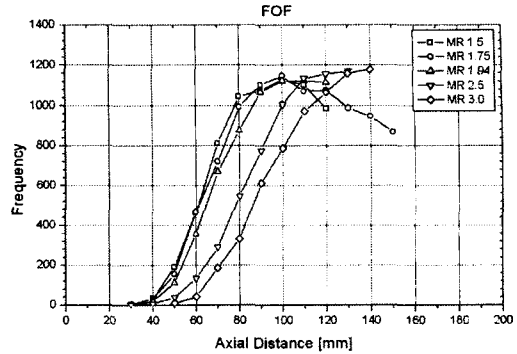


Fig. 4 F-O-F 분사기의 운동량비 변화에 따른 분무형상 및 미립화 정도

산화제와 연료의 운동량비가 증가함에 따라 분사기 중심의 산화제의 운동량이 증가하면서 분무가 반경방향으로 퍼지지 못하고 안쪽으로 모이게 되는 것을 알 수 있고, 분무각은 운동량비가 1.5에서 3.0으로 증가함에 따라 46.5°에서 37°로 감소된다. 분무 하방향 영역에서의 미립화 경향을 보면 중심 산화제 운동량이 증가하면서 breakup length가 길어지고, 미립화 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 이는 F-O-F 분사기에서 운동량비가 증가할수록 중앙 산화제의 많은 유량이 주위의 연료 분류의 충돌에 의해 효과적으로 분열되지 않기 때문으로 보여진다. 또한 산화제 운동량이 커짐에 따라 액적의 불규칙성도 따라서 증가하는 것으로 파악된다. Fig. 5에 레이저 광원을 이용한 광감쇄기법 적용 결과를 도시하였다.



(a)

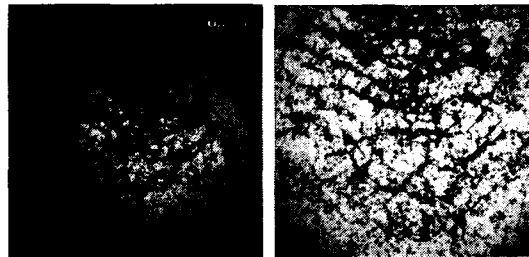


(b)

Fig. 5 FOF 분사기 축방향 길이에 따른 산란광 강도 및 빈도

광강도 신호로부터 추론할 수 있는 액막의 분열이 일어나는 지점은 분사기 출구로부터 25mm 떨어진 영역에서부터 액막이 분열되기 시작함을 알 수 있다. 운동량비의 변화에 따라 액막의 초기 분열이 일어나는 지점은 25mm 영역으로 일정하지만 운동량비가 증가하면, 분무의 중심축상에 분포하는 액적의 분포가 밀집되게 되어 광강도가 감소하게 됨을 알 수 있다. 운동량비가 설계점 이하인 경우에는 액적에 의한 광산란 신호의 빈도가 최대로 나타나는 지점이 축방향으로 100mm 지점에서 나타나는데 비해, 그 이상의 운동량비에 있어서는 140mm 이상되는 축방향 거리에서 빈도가 최대로 나타나게 된다.

Fig. 6에 O-F-O 형 분사기의 분무 사진을 운동량비에 대해 나타내었다.



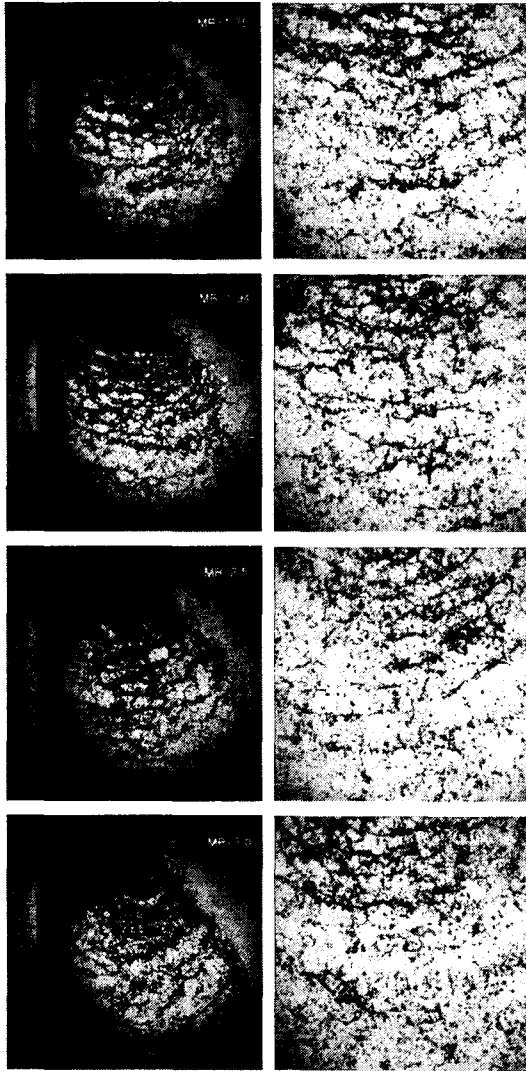
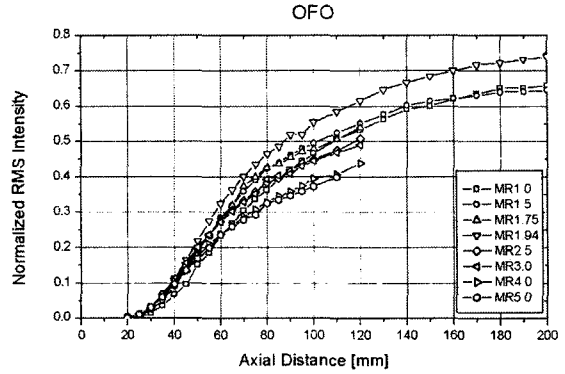


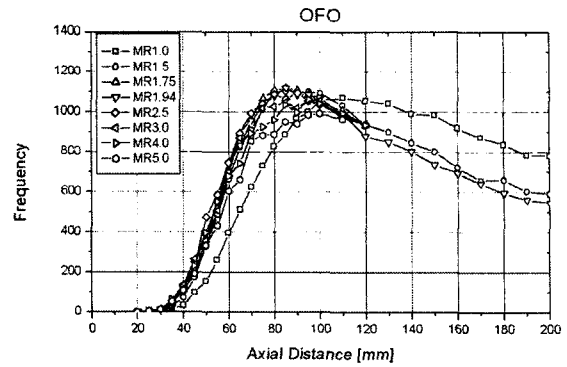
Fig. 6 O-F-O 분사기의 운동량비 변화에 따른 분무형상 및 미립화 정도

F-O-F형 분사기의 분무형태와는 반대로 운동량비가 증가함에 따라 분사기 주위 산화제의 운동량이 증가하면서 분무가 반경방향으로 퍼지며, 운동량비가 1.0에서 5.0으로 증가함에 따라 분무각은 69° 에서 91° 로 증가한다. 하방향 영역에서의 미립화 경향을 보면 분사기 주위 산화제의 운동량이 증가하면서 **breakup length** 길이가 짧아지고, 미립화 특성이 좋아지는 것을 알 수 있다. 이는 O-F-O분사기에서 F-O-F 분사기에 비

해 산화제 분사공의 직경이 작고, 상대적으로 큰 산화제의 운동량을 액주의 분열에 사용할 수 있는 구조로 분무의 분열 및 미립화에 강점을 갖기 때문이다. Fig. 7에 광감쇄기법 적용 결과를 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 7 O-F-O 분사기 축방향 길이에 따른 산란광 강도 및 빈도

분사기 출구 하방 20mm 영역에서 액막이 분열되기 시작하고, 광강도의 RMS 신호의 크기가 미립화의 정도를 정성적으로 나타내준다고 가정하면 설계점에서 많이 벗어난 운동량비에 대해서는 미립화 성능이 감소하지만 설계점 주위의 운동량비 조건에서는 미립화 성능이 비교적 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 광산란 신호의 최대 빈도가 나타나는 축방향 거리도 80mm에서 90mm 사이에 위치하여 F-O-F 분사기보다 우수

한 미립화 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

2.4.2 혼합특성

우선 Fig. 8에 F-O-F 분사기의 운동량비 변화에 따른 모의 산화제와 연료의 질량분포의 변화를 나타내었다. 분사기 출구로부터 분무 채집기 입구면까지의 수직거리는 150mm인데, 이는 분무채집의 공간분해능을 높이기 위해 분무채집기의 셀 안에 분무된 추진제가 채집될 수 있는 최대거리로 선정하였다.

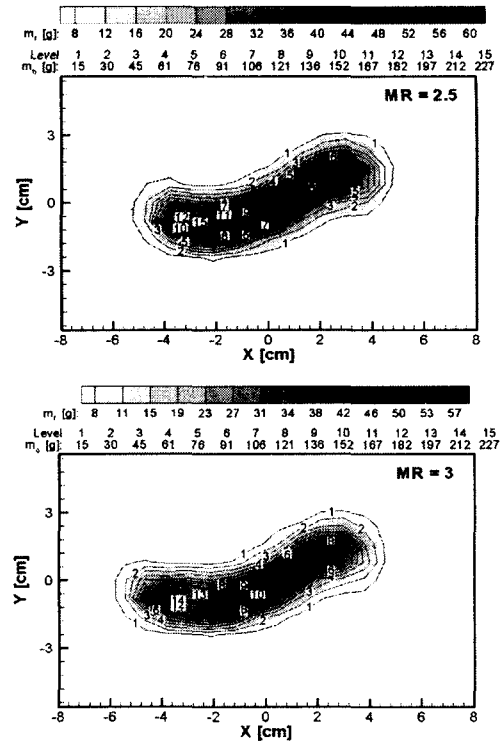
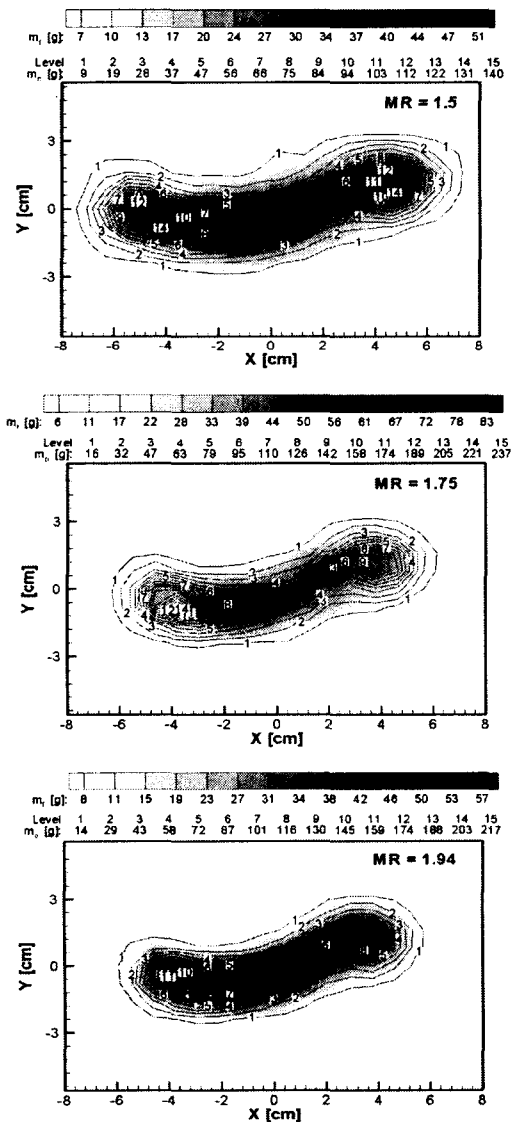


Fig. 8 F-O-F 분사기 운동량비 변화에 따른 산화제 및 연료 분포

운동량비가 1.5인 경우에는 연료 질량의 공간 분포는 비교적 균일하게 나타나는데 비해, 산화제의 질량분포는 분무의 양쪽으로 몰려있는 형태이다. 이는 중심 산화제의 분사속도 및 운동량이 작은 경우에, 주위로부터 분사되는 연료의 운동량이 상대적으로 크기 때문에 중심의 저속, 저운동량의 산화제에 강하게 충돌하여 산화제를 양쪽으로 분산시키기 때문으로 보여진다. 산화제의 운동량이 증가함에 따라 산화제와 연료의 질량분포는 변화하게 되는데, 산화제의 경우 운동량비가 증가함에 따라 분무 외곽에 위치 하던 최대 분포 위치가 분무의 중심으로 이동하고, 연료분무의 경우에는 산화제를 타고 흐르면서 중심부에 최고 분포를 보인다. 따라서 운동량비가 증가하게 되면 산화제와 연료가 모두 중심축상에 모이게 됨을 알 수 있다.

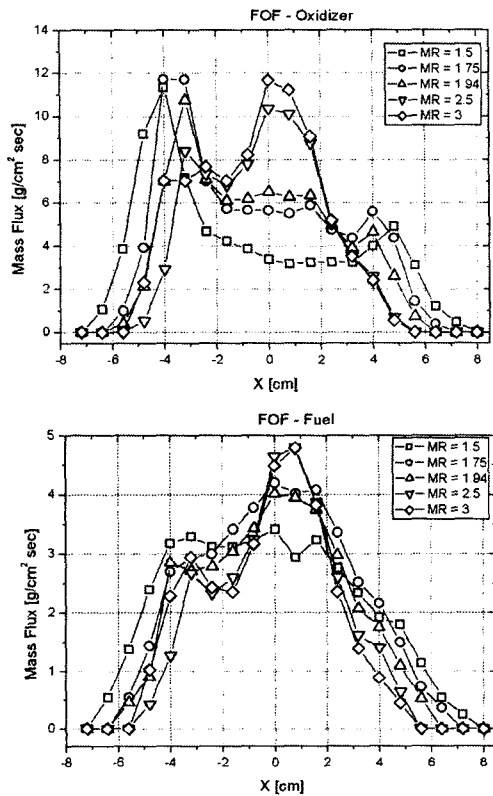


Fig. 9 F-O-F 분사기 횡단면 추진제 질량 플럭스 분포

Fig. 9는 분무채집 결과의 질량분포와 채집시 간으로부터 환산한 산화제와 연료의 질량 플럭스 분포를 분사기 중심 단면에 대해 나타낸 것이다. 산화제 질량 플럭스는 운동량비가 작은 경우에는 분무의 좌우 양측에 분산되어 있다. 산화제 운동량이 증가하면서, 분무 중심으로 질량플럭스가 증가함을 알 수 있다. 연료의 경우 운동량 비가 작은 경우에는 분무 중심에서의 연료 질량 플럭스가 비교적 균일한 분포를 보이다가, 운동량비가 증가하면서 분무의 횡단면에서의 질량플럭스의 폭은 감소하는데 비해 중심부에서의 연료 질량 플럭스 값이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10에서 F-O-F 분사기에서 운동량비가 증가함에 따라 혼합효율이 80%~86%의 작은 범위 내에서 변화함을 보여준다. 혼합효율을 예측

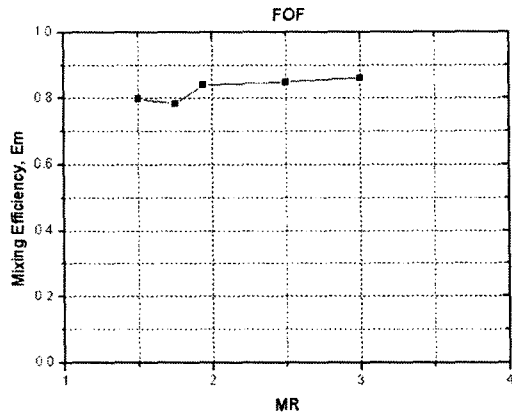
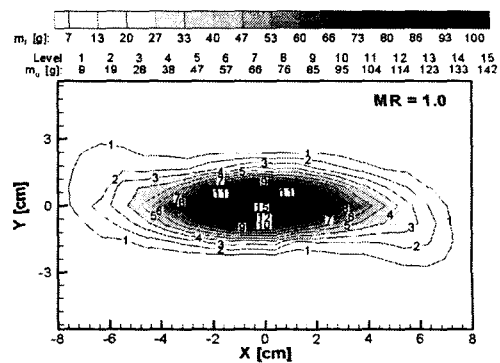


Fig. 10 F-O-F 분사기의 운동량비 변화에 따른 혼합효율

하는 식은 Rupe(1953)가 제시한 식을 이용하였다. (2)

Fig. 11은 O-F-O 분사기의 운동량비 변화에 따른 모의 산화제와 연료의 질량분포의 변화를 나타내었다. 출구로부터 채집부 입구면까지의 수직거리는 80mm이다.

운동량비가 1인 경우, 연료 및 산화제의 질량 분포는 비교적 균일하게 나타나지만 운동량비가 증가함에 따라 주위의 강한 산화제의 운동량이 분사기 중심의 연료를 침투해서 분무의 주위로 밀어내고 있음을 알 수 있다. 이는 산화제의 운동량이 연료의 운동량에 비해 과다하게 큰 경우에 중심 연료가 산화제 충돌점을 관통하지 못하고 충돌점 주위의 액막을 타고 주위로 흘러 나가기 때문으로 판단된다.



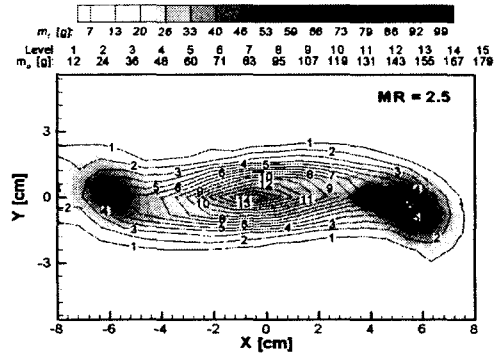
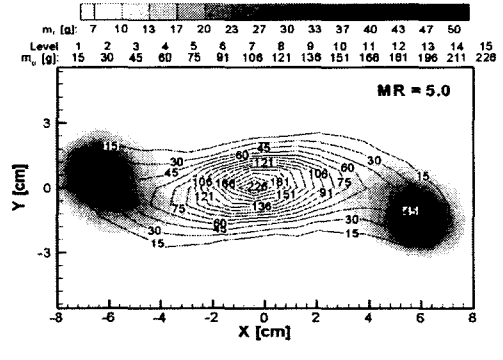
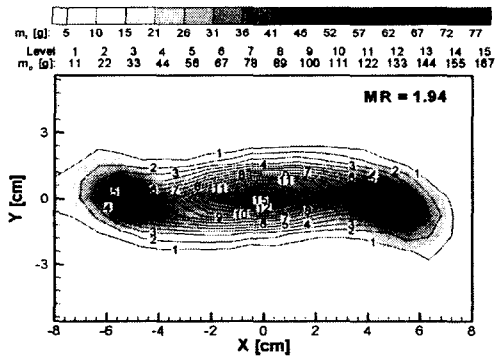
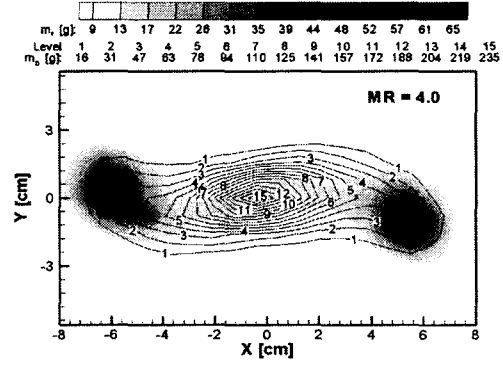
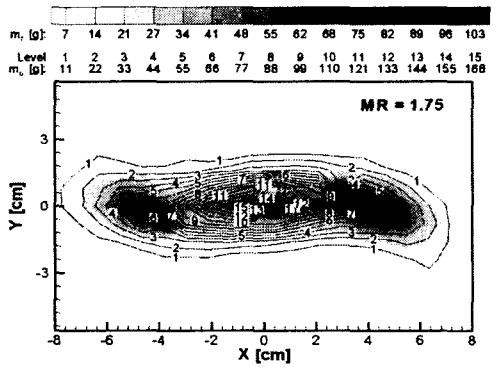
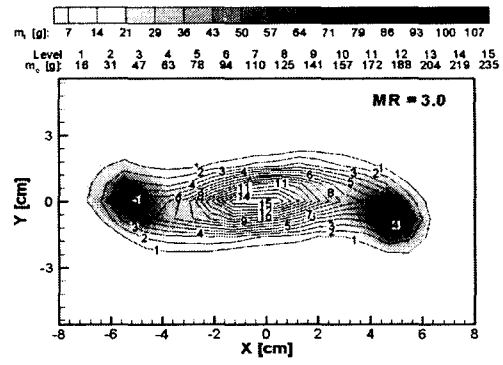
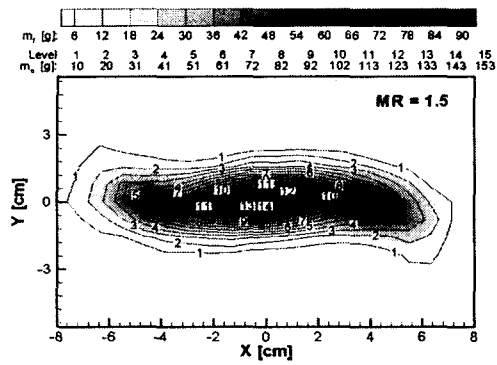


Fig. 11 O-F-O 분사기 운동량비 변화에 따른 산화제 및 연료 분포

Fig. 12는 산화제와 연료의 질량 플럭스 분포를 분사기 중심 단면에 대해 나타내었다. 산화제를 살펴보면 운동량비가 작은 경우에는 분무의 중심에 비교적 고르게 분포되어 있다가 산화제 운동량이 증가하면서 분무 중심으로의 질량 플럭스가 큰 구배를 갖고 증가하고 있음을 알 수 있다. 연료의 경우는 운동량비가 작은 경우 분무 중심에서의 질량 플럭스가 큰 분포를 보이다

가 운동량비가 증가하면서 주위로 밀려남을 볼 수 있다.

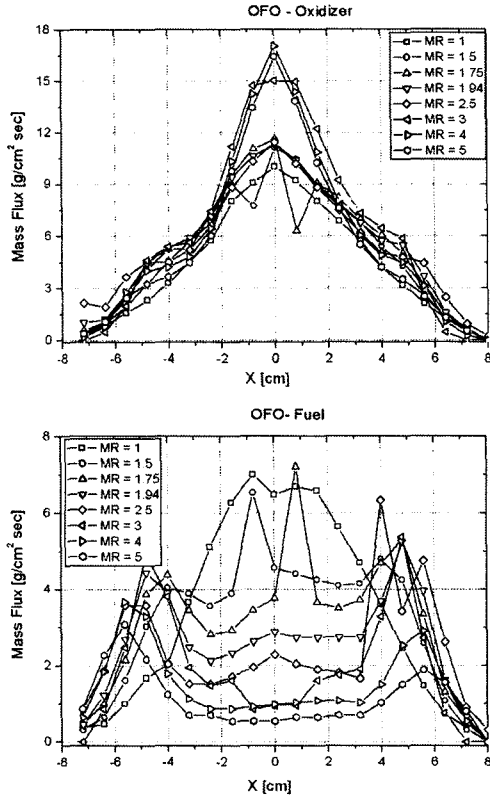


Fig. 12 O-F-O 분사기 횡단면 추진제 질량 플럭스 분포

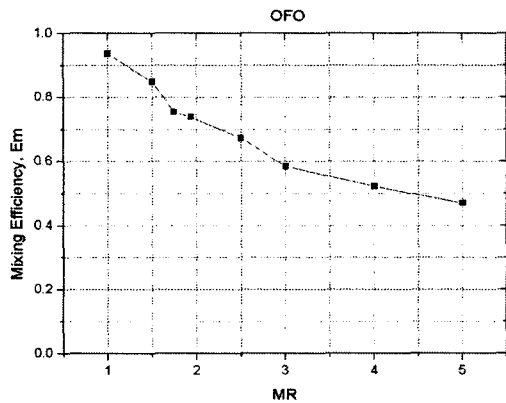


Fig. 13 O-F-O 분사기 운동량비 변화에 따른 혼합효율

Fig. 13은 O-F-O 분사기의 운동량비 변화에

따른 혼합효율의 변화를 나타내었다. 운동량비 1.0에서 5.0까지 증가함에 따라 혼합효율이 93%~47%로 감소함을 알 수 있다. 이러한 큰 폭의 변화는 O-F-O 분사기의 특징적인 결과로서 과도한 주위 산화제의 운동량에 의해 연료와 산화제의 분리가 일어나기 때문으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 unlike 충돌형 triplet 분사기인 F-O-F 형과 O-F-O 형의 분무특성과 혼합특성에 관하여 알아보았다. 실험적 연구를 통해 각 분사기가 가지는 특성들에 대한 고찰이 이루어졌으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 산화제와 연료의 운동량비가 증가함에 따라 분무각의 변화는 F-O-F형은 중심의 강한 산화제의 운동량으로 감소되는 반면, O-F-O형은 주위의 강한 산화제의 운동량으로 인해 증가한다.
2. 미립화 성능 측면에서는 O-F-O형이 더 우수함을 알 수 있었다.
3. 혼합 성능 측면에서는 O-F-O형의 경우 운동량비가 설계점보다 큰 경우 혼합효율이 상당히 크게 변화했는데, 이는 연료에 비해 상당히 큰 산화제의 운동량에 의해 연료가 분무의 좌우로 분리되어 공간적인 질량 분포 특성이 나빠지기 때문이다.
4. O-F-O형 분사기의 설계 변경시 고려할 사항은 충돌각을 조절하여, 양호한 미립화 성능을 유지하면서도 주위 산화제의 중앙 연료로의 과대한 침투를 줄여주어 혼합 성능을 개선하는 것이 필요하다.

참고 문헌

1. G.S.Gill and W.H.Nurick, "Liquid Rocket Engine Injectors," NASA SP-8089, 1976
2. J. H. Rupe, "The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Stream", Jet Propulsion Lab, Progress Rept. 20-195, California Inst. of Technology, Pasadena, CA, August 6, 1953.