

# 분리 충돌형 분사기의 액상 혼합 메커니즘에 관한 실험적 고찰

이 성 웅\* · 조 용 호\* · 윤 용 섭\*\* (연세대학교)

## The Experimental Study of Liquid Phase Mixing Mechanism of Split Triplet Impinging Spray

Seong-Woong Lee\*, Yong-Ho Cho\* and Woong-Sup Yoon\*\*

### ABSTRACT

Liquid phase mixing of impinging injector is a resultant byproduct from the momentum exchange between a pair of impinging jets and penetration of opponent jet. Principal aim of the present study is revealing the liquid phase mixing mechanism of split triplet impinging injection sprays, and thus extending our understanding on this particular injection element. Overall mixing extent is estimated from patternation tests by the use of purified tap water and kerosene to simulate the real propellant components, respectively, and with the liquid jet momentum ratio, a controlling mixing parameter, in the range of 0.5 to 6.0. Emphasis is placed on the effect of liquid sheet superposition and disintegration, and the results with detailed spray visualization revealed the fact that superposed liquid sheet disintegration is the main pathway of liquid phase mixing of split triplet impinging injector to yield enhanced mixing qualities.

### 1. 서 론

액상의 추진제의 혼합·미립화·연소를 통해 분사 에너지를 발생시키는 로켓 엔진의 성능에 관한 연구들은 1950년 이후 지금까지 50여 년간 활발히 이루어졌다. 일련의 연구를 통하여 분사된 추진제의 혼합·미립화 과정이 액체 추진 로켓엔진의 성능에 결정적인 영향을 미치는 요인이 됨이 밝혀졌다[1]. 액상의 연료와 산화제를 사용하는 이원 액체 추진 로켓 엔진(bi-liquid propellant rocket engine)의 여러 가지 추진제 분사 방식 중 충돌형 분사 방식의 경우 제작의 용이성과 생산비의 절감 그리고 우수한 혼합 특

성으로 인해 추진제의 충돌로 인한 연소 불안정의 문제에도 불구하고 선호된다.

특히 분리 충돌형 분사기(split triplet impinging injector)의 경우 일반적으로 널리 사용되는 이중 충돌형 분사기(unlike doublet impinging inject)보다 혼합 성능이 우수하다는 것이 밝혀졌는데[2], 이차 충돌 각의 변화와 상대 제트로의 침투 깊이 정도가 분리 충돌형 분사기의 양호한 혼합특성을 설명하는 주요 요인으로 분석되었다. 하지만 본 실험 결과 앞서 연구되었던 이차 충돌은 엄격한 의미의 충돌이라기보다는 일차 충돌로 형성된 액막의 중첩이라는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 비반응성 모사 추진제를 사용하는 분리 충돌형 분사기의 혼합 메커니즘을 패터네이터

\* 연세대학교 기계공학과 대학원 (Yonsei University, Graduate School Dept. of Mechanical Eng.)

\*\* 연세대학교 기계공학과 (Yonsei University, Dept. of Mechanical Eng.)

(patternator)를 통한 혼합 실험과 CCD 카메라를 이용한 제트 충돌·액막 중첩의 가시화를 통해 액막의 중첩으로 설명하고자 한다.

## 2. 실험장치와 실험방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용한 분리 충돌형 분사기(FOOF)의 재원은 Photo. 1과 같다. 측면 분사공에서는 연료 제트가 분사기 축 방향과 30°의 충돌 각으로 분사되어 중앙의 산화제 제트와 충돌하게 된다. 두 쌍의 산화제·연료 제트의 충돌로 타원형 액막이 형성되는데, 이 두 액막은 설계 각도 30°에서 벗어난 충돌 각으로 충돌·중첩된다. 연료 분사공 직경은 0.4mm로 일정하며 산화제 분사공은 0.4, 0.5 그리고 0.6 mm로 확공하였다. 분사기에서 분사된 산화제와 연료가 충돌하는 충돌 거리는 연료 분사공 직경의 5배인 2mm이며 충돌 거리로부터 액막이 충돌·중첩되는 중첩 거리는 2mm 보다는 항상 크며 운동량 비(Moementum Ratio : MR)가 증가함에 따라 대략 2.2~2.4mm의 중첩 거리를 갖는다. 분사기의 L/D는 6이며 유량 계수는 약 0.9~0.85로 압력 강하에 따른 비선형 유동현상은 발견되지 않았다.

본 시험에서 사용한 페터네이터는 가로 세로 각각 7mm×7mm의 정방형 셀 140개로 구성된 격자를 통해 분무를 채집하도록 설계되었다. 각 셀 간의 칸막이 두께는 모사 추진제의 튀김을 최소화하기 위해 0.3mm가 되도록 제작하였으며 이 격자를 통해 얻은 추진제의 국소 질량을 채집하여 혼합 효율을 계산하였다. 이때 분무의 수득율은 85%~90%로서 실제 분사한 추진제 양과는 차이가 있지만 기존의 실험결과에 비해 상당히 개선된 값을 가진다[3, 4]. 이때 부족한 추진제의 양은 측정 양과 손실 양을 비례 배분하여 질량보존을 만족시켰다. 분사기 단면과 페터네이터 격자 셀 간의 거리인 채집거리는 6.2cm이며, 이는 100 $\mu$ m의 완전 구형 액적이 분사기에서 분사되어 200 psi의 균일 압력하의 연소장에서 완전 기화될 때까지의 거리를 수치적으로 계산하여 얻은 값이다.

추진제는 연료의 경우 케로신(kerosene)을 사용하였고 산화제의 경우 액체 산소(LO<sub>x</sub>) 대신 모사 추진제인 물을 사용하였으며 최소 1psi까지 차압 조절이 가능한 자동 서버 압력 조절장치를 이용하여 질소로 가압하여 분사된다(Photo. 2). 분사기에서 분사된 추진제 제트는

레이놀즈 수 3,000~20,000의 값을 갖는 난류 거동을 한다. 연료의 유량은 10m/s로 고정시키고 산화제의 유량을 증가시켜면서 실험을 수행하였다. 충돌 가시화를 위한 CCD 카메라는 LAVISION사의 Imager 3이며 광원은 DX-525A stroboscope를 사용하였으며 산화제와 연료분사공 직경 0.4mm만을 실험하였다.

### 2.2 실험 방법

Photo. 2는 혼합특성 실험을 위한 수류시험장치를 보여주고 있다. 수류 실험장치는 작동 조건을 입력하고 전반적인 실험을 통제하며 데이터를 획득하는 데이터 획득부 DAS(Data Acquisition System)와 추진제를 가압하는 추진제 공급 장치부 그리고 분무를 채집하는 채집부로 나뉜다. 혼합 성능 실험에 있어서 가장 중요한 점은 대기압에서 분사할 때 분사차압에 따라 정확하게 유량을 제어할 수 있는가하는 분사 차압의 정확한 조절여부이다. 따라서 앞서 언급한 바와 같이 최소 1psi까지 차압 조절이 가능한 자동 서버 압력 조절장치를 이용하여 추진제의 유량을 제어한다. 분사된 추진제는 격자를 통해 100 ml 용량의 메스실린더에 채집된다. 채집된 추진제의 국소 질량은 밀도차이에 의해 분리 측정되며 실험 작동 시간은 저압 분사의 경우 60초, 고압 분사의 경우 30초로 설정하였다.

충돌 가시화를 시험의 경우 광원으로 사용된 stroboscope는 CCD 카메라의 노출 시간 내에 광원을 주사하여 빠른 속도로 움직이는 제트의 정지 화상을 얻을 수 있도록 하였다. Stroboscope의 발광시간은 7ns(low frequency)와 10ns(high frequency)를 유지하도록 하여 정지된 화상을 획득하기 위해 충분히 작은 노출시간을 확보하였다.

## 3. 결과 및 분석

분리 충돌형 분사기의 충돌 과정은 Photo. 1과 같이 두 단계로 나뉜다. 서로 다른 운동량을 갖는 제트 상태의 충돌을 겪는 비평형 상태 제트 충돌 영역(Unbalanced Jet Impinging Region)과 동일한 운동량을 가지는 평형상태 액막 충돌·중첩 영역(Balanced Liquid Sheet Impinging and Superposition Region)을 거치면서 분무는 혼합된다. 따라서 비평형 상태 제트 충돌 영역에서는 이중 충돌형 분사기의 충돌 과정과 동일한 원리로 충돌을 겪게되며 이때 충돌

에 결정적인 영향을 미치는 요소는 제트의 운동량이다. 하지만 평형 상태 액막 충돌·중첩 영역에서는 제트 충돌로 형성된 두 액막의 운동량이 동일하기 때문에 액막의 상태가 혼합을 결정하는 주요 원인이 된다. 따라서 분리 충돌형 분사기의 액상 추진제의 혼합 메커니즘은 액막의 충돌·중첩에 의한 액막 붕괴(liquid sheet disintegration)로 설명할 수 있다.

### 3.1 이차 충돌 효과

Fig. 1 (a)는 분리 충돌형 분사기의 분사공 직경 비와 운동량 비에 따른 혼합 효율 변화를 보여주고 있다. 각 분사공 직경 비에서 산화제와 연료제트의 운동량 비가 같아질 때(등가 운동량 비)까지 혼합 효율은 증가하다가 이후 감소하는데, 직경 비 1.5의 경우에는 등가 운동량 비 이후 상당히 완만하게 감소하는 특징을 갖는다. 또한 분사공 직경 비가 증가할수록 혼합 성능도 우수해진다.

Fig. 1 (b)는 분사공 직경 비와 운동량 비에 따른 2차 충돌 각의 변화를 보여주고 있다. 분리 충돌형 분사기의 혼합 특성에 대한 기존의 연구 결과들은 2차 충돌 각의 변화가 혼합 특성을 결정하는 주요한 요소라고 결론지었으나 Fig. 1 (b)를 보면 헛기저 흥미로운 사실을 알 수 있다. 2차 충돌 각이 감소할수록 혼합 성능은 우수해지지만 직경 비 1.25와 직경 비 1.5의 경우 거의 동일한 2차 충돌각 변화를 보여주나 각각의 혼합 특성은 등가 운동량 비 이후 상당히 다른 양상을 띤다. 따라서 직경 비 1.25와 직경 비 1.5를 갖는 분리 충돌형 분사기의 혼합 효율은 더 이상 2차 충돌 각의 함수가 아니다. 즉 분리 충돌형 분사기의 혼합 성능은 충돌 자체에 의해 결정되기보다는 2차 충돌 상태에 의해 결정될 수 있음을 알 수 있다.

결과적으로 분리 충돌형 분사기의 혼합을 설명하기 위해서는 다른 실험 변수가 필요한데 본 실험은 분리 충돌형 분사기의 혼합 성능을 결정하는 주요 원인으로 2차 충돌 상태를 새로운 실험 변수로 제안하며 이를 충돌 가시화를 통해 연구하였다.

### 3.2 액막 충돌과 중첩

Photo. 3 (a)는 좌측 오리피스 한 쌍이 막힌 분리 충돌형 분사기(Half split triplet impinging element : 폐쇄 분리 충돌형 분사기)의 제트 충돌을 보여주고 있다. 분사기의 분사면에서 제트

의 충돌 지점까지의 거리(제트 충돌거리:  $L_1$ )는 분사공 직경의 5배인 2mm이다. Photo. 3 (b)와 (d)는 분리 충돌형 분사기의 충돌을 찍은 사진으로, 제트 충돌 거리는 폐쇄 분리 충돌형 분사기와 마찬가지로 2mm이지만 제트의 충돌 이후 두 번째 충돌이 일어나는 거리(액막 충돌거리:  $L_2$ )는 약 2.2~2.4mm 정도이다. 폐쇄 분리 충돌형 분사기의 제트의 충돌은 충돌 각이 30. 인 이중 충돌형 분사기의 충돌과 동일하다. 두 제트의 충돌로 형성되는 분무의 형상을 제트 충돌 거리 이후  $L_2$  mm 하류에서 살펴본 결과 그 위치에서는 제트 혹은 융합 제트(coalesced jet)가 아닌 액막으로 존재한다는 것을 알게되었다.

충돌점 인근의 액막의 속도는 제트의 속도와 거의 비슷하기 때문에 만약 액막이 중첩 없이 충돌만을 겪는다면 분사면 아래  $L_1+L_2$ 의 위치에서 액막은 충돌한 후 원호 모양의 ligament 군을 형성하여야 할 것이나 Photo. 3 (b)에서 보는 바와 같이 충돌한 액막은 더욱 신장되고 넓어진 액막을 형성하게 된다[5]. 액막이 중첩되지 않는다면 Photo. 3 (b)와 같은 연속적인 과형이 아니라 간헐적인 액적 군 혹은 ligament 군을 보일 것이다. 또한 Photo. 3 (c)에서 보는 바와 같이 두 제트의 충돌로 형성된 액막의 두께는 충돌하는 제트의 두께, 즉 직경보다 작다. 따라서 만일 두 액막이 중첩되지 않고 충돌만 겪게 된다면 액막 충돌 이후의 액막의 두께는 제트 충돌로 형성된 액막의 두께와 같거나 작아야 할 것이나 Photo. 3 (d)에서 보는 바와 같이 액막의 두께가 증가한 것을 보아 액막은 중첩된다는 사실을 확인할 수 있다. Fig. 2 (a)와 (b)는 운동량 비가 1일 때 이중 충돌형 분사기의 추진제 공간분포를, Fig. 2 (c)와 (d)는 분리 충돌형 분사기의 추진제 공간 분포를 보여주고 있다. 공통점은 두 경우 모두 운동량 비가 1일 때, 즉 동일한 운동량으로 충돌한다는 것이며, 차이점은 전자의 경우 제트의 충돌이며 후자의 경우 액막의 충돌이라는 것이다. 주어진 분사 각(충돌 각)으로 그리고 동일한 운동량으로 충돌을 겪게 되는 제트의 경우 분사 방향에 수직한 방향(액막 방향)으로 추진제가 퍼지게 된다. 즉 동일한 운동량 충돌에 의한 혼합의 가장 큰 특징은 액막 방향으로의 퍼짐이다. 하지만 분리 충돌형 분사기의 경우 추진제의 공간 분포를 결정하는 액막 충돌의 결과물 볼 때 중앙으로 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 충돌이 혼합을 결정하는 주요 요인일 경우에는 발생하지 않으며 따라서 액막이

중첩된다는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 분리 충돌형 분사기의 이차 충돌은 제트가 아닌 액막 상태의 충돌이며, 이 충돌은 이중 충돌형 분사기에서와 같이 운동량 교환이나 상대 제트로의 침투를 통한 혼합/미립화 과정으로서의 충돌이 아니라 두 액막의 중첩의 시작 단계로서의 충돌임을 알 수 있다.

### 3.3 액막 중첩 효과

Photo. 2 (a)에서 보는 바와 같이 분리 충돌형 분사기에 의해 형성된 분무는 이중 충돌형 분사기와는 달리 충돌에 의한 운동량 교환에 의해 미립화되는 액적으로 구성된 분무가 아니라 동일한 운동량을 가지는 액막의 중첩과 그 액막의 붕괴(disintegration)에 의해 형성된 액적으로 구성된 분무이다. 즉 이중 충돌형 분사기의 경우 제트의 충돌로 인한 운동량 교환에 의해 Heidmann 등이 제안한 fully developed pattern으로 미립화/혼합된 채로 채집되는 반면, 분리 충돌형 분사기의 경우 액막 분열에 의한 미립화/혼합 과정을 거쳐 채집된다[6]. Rupe 등이 제안한 혼합 효율 식은 분사된 추진제의 국소 혼합비가 총 혼합비에서 얼마나 이탈한 것인가(혼합비 이탈도)를 정량적으로 나타낸 것이다[3]. 따라서 제트 충돌로 인해 미립화/혼합되는 경우 분무의 퍼짐 현상이 현저해 지며, 특히 운동량 비가 높아질수록 운동량이 작은 연료 분무는 심하게 굴절되는 현상이 발생하는데(Fig. 3 (a) and (b)) 이는 결과적으로 혼합비 이탈도를 증가시켜 혼합 효율을 떨어뜨리는 요인이 된다. 반면 분리 충돌형 분사기의 경우 운동량 비 1이상의 영역에서는 산화제와 연료 모두 중앙에 집중하게 되므로 혼합비 이탈도가 상대적으로 작아지며 혼합 효율은 증가하게 된다(Fig. 3 (c) and (d)).

## 4. 결 론

분리 충돌형 분사기의 혼합 성능에 중요한 영향을 미치는 실험 변수로 2차 충돌 상태, 즉 액막 충돌을 제안하였다. 분리 충돌형 분사기의 혼합 메카니즘은 1차 제트 충돌로 형성된 액막이 충돌·중첩하여 새로운 액막이 형성·붕괴되는데 연료와 산화제 분무의 중앙 집중에 의해 혼합비 이탈도가 낮아져 그 결과 이중 충돌형 분사기에 비해 상대적인 혼합 성능 향상을 가져온다.

### 참고 문헌

- 1) NASA, "Liquid Rocket Engine Injectors," NASA Space Vehicle Design Criteria SP-8089, 1976
- 2) Young-Duck Won, Yong-Ho Cho, Sung-Woong Lee, Woong-Sup Yoon and Young-Soo Kim, "Effect of Momentum Ratio on the Mixing Performance of Unlike Split Triplet Injector," The Korean Society for Aeronautics and Space Sciences, Vol. 29, No. 6, pp.84~94, Sept. 2001.
- 3) F. W. Heohn, J. H. Rupe and J. G. Sotter, "Liquid-Phase Mixing of Bipropellant Doublets," Technical Report 32-1546, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., Apr. 20, 1972.
- 4) Kazuo Sato, "A Study of N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Almine Injector Elements Part I. Cold Flow Test," NAL Report, TR-899, pp.1-13, 1986.
- 5) G. I. Taylor, "Formation of Thin Flat Sheets of Water," Proceeding of the Royal Society of London, Vol. 259, Pt. 3, pp.392-400, 1964.
- 6) M. F. Heidmann, R. J. Preim and J. C. Humphrey, "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets," NACA Technical Note 3835, March 1957.

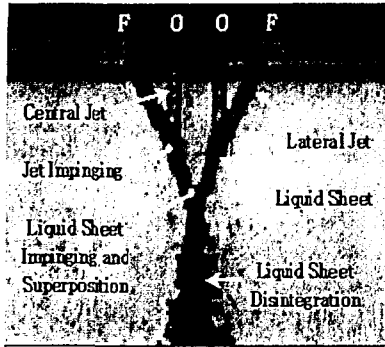


Photo. 1 Mixing process of split triplet impinging element

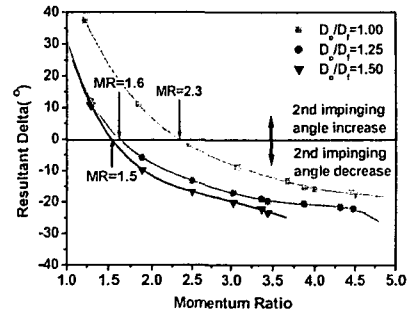


Fig. 1 (b) Variation of second impinging angle of split triplet impinging element versus momentum ratio with diameter ratio from 1.00 to 1.50

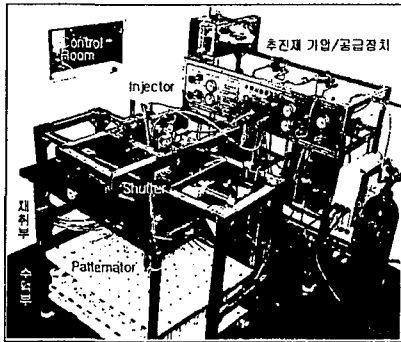


Photo. 2 An experimental setup of cold flow test

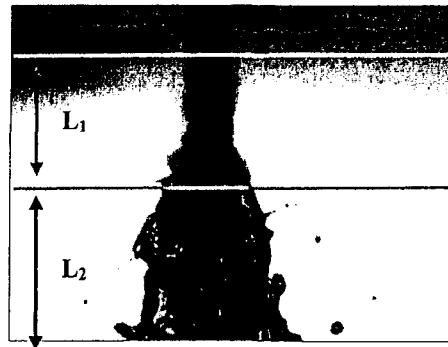


Photo. 3 (a) Half FOOF at MR=1

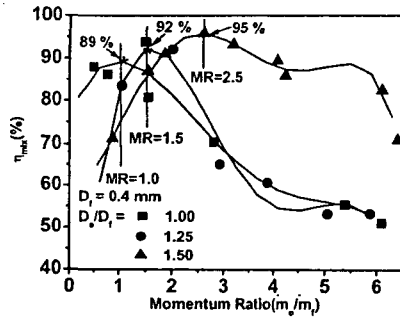


Fig. 1 (a) Mixing performance of split triplet impinging element versus momentum ratio with diameter ratio from 1.00 to 1.50

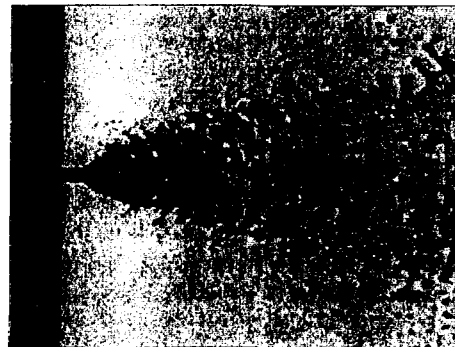


Photo. 3 (b) FOOF at MR=1



Photo. 3 (c) Half FOOF at MR=1

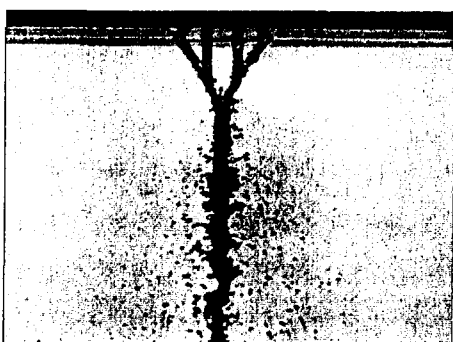
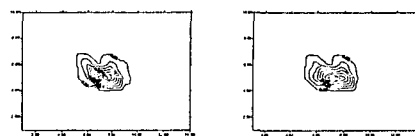


Photo. 3 (d) FOOF at MR=1

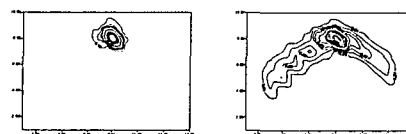
Photo. 3 Liquid sheet formed by jet impinging for half split triplet impinging element(Photo. 3 (a) and (c)) and liquid sheet superposition and disintegration of split triplet impinging element(Photo. 3 (b) and (d)) at unity momentum ratio for  $D_o/D_f=1.00$ .



(c) MR=1.0  
oxidizer

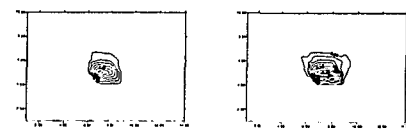
(d) MR=1.0  
fuel

Fig. 2 Propellant spatial distribution of unlike doublet(Fig. 2 (a) and (b)) and split triplet impinging element(Fig. 2 (c) and (d)) at unity momentum ratio for  $D_o/D_f=1.00$ .



(a) MR=4.0  
oxidizer

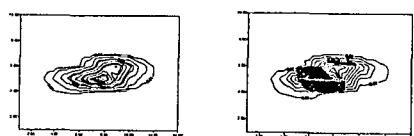
(b) MR=4.0  
fuel



(c) MR=4.0  
oxidizer

(d) MR=4.0  
fuel

Fig. 3 Propellant spatial distribution of unlike doublet (Fig. 3 (a) and (b)) and split triplet impinging element(Fig. 3 (c) and (d)) at MR=4.0 for  $D_o/D_f=1.00$ .



(a) MR=1.0  
oxidizer

(b) MR=1.0  
fuel