

## 이유체(異流體) 충돌 분사기의 혼합특성에 관한 연구

한재섭\* · 김선진\*\* · 김 유\*

### A Study of mixing characteristics of unlike impinging streams doublet injector

Jae-Seob Han\* · Seon-Jin Kim\*\* · Yoo Kim\*

#### ABSTRACT

Mixing characteristics of unlike impinging streams double injectors have a great effect on combustion stability and combustion efficiency for liquid rocket engine. In this study a cold test was carried out, using water and TCE as simulants, in order to examine the effect of design parameters such as impingement angle, orifice diameter ratio and momentum ratio on the mass distribution and mixing quality.

#### 초 록

액체로켓에서 설계된 추진제를 엔진내로 분사하고, 미립화 및 혼합시키는 분사기로서, 널리 사용되어 온 이유체 충돌분사기의 혼합특성은 연소안정성 및 연소효율에 주요한 영향을 미치는 인자이다. 따라서 본 연구는 이유체 충돌 분사기의 설계변수인 충돌각, 오리피스 직경비 및 운동량비가 질량분포 및 혼합성능에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 추진제대용으로 물과 TCE를 사용하는 비연소시험법에 의해서 수행되었다.

#### 기호설명

MR : Mixture ratio

R :  $MR/(1+MR)$ , Injected

$N_R$  : Rupe Number

$MF_i$  : Mass fraction at ith cell

C :  $\rho_o V_o^2 d_o / \rho_f V_f^2 d_f$

$E_m$  : Mixing quality

r :  $MR/(1+MR)$ ,  
at any cell within the spray

CMF : Cumulative mass fraction

Efficiency :  $E_m \times 100$

#### 1. 서 론

유체를 원하는 크기의 미립자로 만드는 기술

은 도색, 소화설비, 자동차, 항공기 및 로켓등 아주 다양한 분야에서 필수적인 기술로 요구되어 왔다. 따라서 미립화 기술은 오랜 기간에 걸

\* 충남대학교 (Chungnam National University)

\*\* 청양대학 (Cheongyang Provincial Coolege)

쳐 많은 연구가 수행되어 왔고, 상당한 발전을 이룩하였으나, 대부분의 연구가 단일 유체의 미립화 현상 및 공기와 연료와의 간섭에 의한 미립화 현상에 대한 것이었다. 한편, 우주발사체에 사용되는 액체로켓 엔진은 일반적으로 액체상태의 산화제와 연료를 추진제로 사용한다. 따라서 액체상태의 이종의 추진제를 연소에 적합하도록 엔진내부로 분사하여 미립화·혼합시킬 수 있는 인젝터의 개발이 엔진 개발의 성공 여부를 결정 지을 수 있는 핵심기술이 되어 왔다.

이유체를 한 점에서 총돌시켜 미립화 및 혼합시키는 이유체 총돌분사기는 이러한 인젝터 중 대표적인 것으로 우주선진국에서는 이러한 분야에 대한 연구가 오랜 기간에 걸쳐 이루어져 왔으며, 특히 Dickerson 등<sup>1)</sup>은 분무 특성과 연소성능의 상관관계를 규명하였으며, 혼합도는 연소성능에 결정하는 중요한 분무 특성임을 주장하였다.

우리 나라에서는 90년대 초반까지 이유체 총돌형 분사기에 대한 활용분야가 없었기 때문에 이 분야에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았으나, 액체추진기관을 사용하는 과학관측로켓의 개발사업이 본격화되기 시작하면서 연구의 필요성이 대두되었고, 많은 기본자료의 확보가 절실히 필요하게 됨에 따라 연구가 진행되었다.

특히, 김 유 등<sup>2)</sup>은 이중 총돌형 triplet 인젝터의 혼합도와 연소성능과의 상관관계를 규명하는 연구를 수행하여, 혼합도가 연소성능에 지대한 영향을 미침을 규명하였다. 또한 김 유 등<sup>3)</sup>은 이중총돌형인젝터의 설계변수와 액적의 크기 및 속도에 미치는 영향을 규명하였다. 그러나, 국내에서는 아직 이유체 총돌분사기의 설계변수가 혼합도에 미치는 영향에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 액체로켓의 분사기로 널리 사용되어온 이유체 총돌 분사기의 설계변수인 총돌각, 오리피스 직경비 및 운동량비가 질량분포 및 혼합성능에 미치는 영향을 고찰하여, 설계변수와 혼합성능과의 관계를 규명하였다.

## 2. 혼합도

혼합도는 분사된  $R$ (분사된 산화제 또는 연료 질량유동율과 분사된 전체질량유동율과의 비) 과 각 셀에서의  $r$ (각 셀에 채집된 산화제 또는 연료의 질량유동율과 채집된 전체질량유동율과의 비)에서의 질량 가중된 편향으로 정의되며, 결국 혼합도를 백분율로 표현함으로써 혼합성능을 구할 수 있다. 이러한 것은 도식적으로 Fig. 1과 같이 표현되고, 일점 채선의 경우는 채집기에 채집된 모든 셀의  $r$ 이 주입된  $R$ 과 같은 경우를 의미하고, 굵은 실선과 일점채선으로 둘러싸인 면적은 채집기에 채집된 모든 셀의 산화제 또는 연료가 주입된 연료 또는 산화제로부터의 편향을 의미하는 것으로 결국 혼합정도를 나타낸다. 이러한 편향을 서술하는 표현은 식(1) 과 같이 나타낼 수 있다.

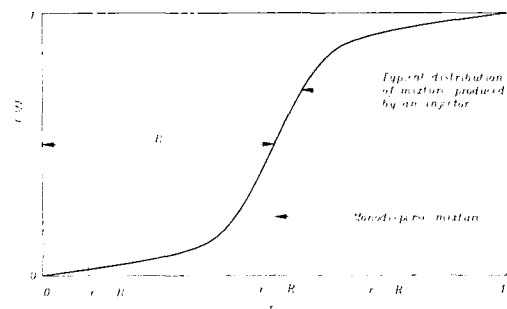


Fig. 1 Cumulative mass fraction vs. r

실제로 혼합분포는 이산화된 유동면적을 포함하고 있는 모의액의 유한한 양을 채집함으로써 얻어질 수 있기 때문에, 식(1)은 유한차분의 형태로 식(2)와 같이 전환될 수 있다.

$$E_m = 1 - \frac{\int_0^{MF_r, R} (R-r) dMF}{\int_0^R dr} - \frac{\int_{MF_r, R}^1 (R-r) dMF}{\int_1^R dr} \quad (1)$$

$$E_m = 1 - \sum_{i=0}^n \frac{MF_i(R-r_i)}{R} - \sum_{i=1}^n \frac{MF_i(R-r_i)}{R-1} \quad (2)$$

이러한 표현을 사용하면, 완전한 혼합은  $E_m$  이 1의 값으로 표현될 수 있고, 완전한 불균일성은  $E_m$ 이 0의 값으로 표현된다.

### 3. 실험장치 및 방법

실험은 추진제 모의액을 사용하는 비연소실험법에 의해서 수행되었고, 실험장치는 모의액을 분사기까지 공급하는 공급장치, 액체를 미립화 및 혼합시키는 분사기, 분사된 액체를 위치 함수로 채집할 수 있는 채집기로 구성되어있고, Fig. 2는 실험장치의 계통도이며, 분사기는 충돌형 분사기의 기하학적 변수를 쉽게 변환할 수 있도록 가변형을 설계 및 제작하였다. Table 1은 20°C, 표준대기압 상태에서의 추진제 모의액의 물성치이다.

Table. 1 Properties of simulants

	Specific gravity	Viscosity (Pa · s)	Surface Tension (N/s)
Trichloroethylene	1.464	$0.79 \times 10^{-3}$	$25.5 \times 10^{-3}$
Water	0.9982	$1.005 \times 10^{-3}$	$72.75 \times 10^{-3}$

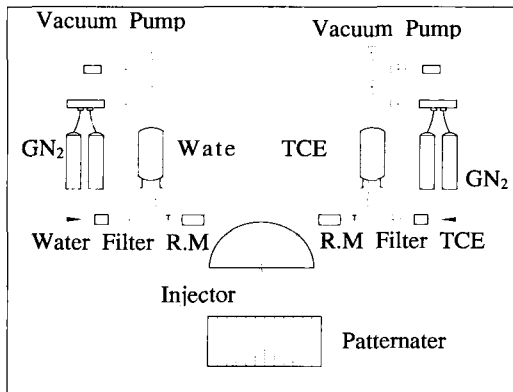


Fig. 2 Schematic diagram of simulants feed system

1950년 Jack Rupe는 이류체 충돌 분사기의 혼합특성에 중요한 영향을 미치는 무차원변수로 식(3)과 같이 정의되는  $N_R$ 을 제시하였고,  $N_R$ 이 0.5일 때 최대 혼합도를 나타낸다고 보고하였다. 따라서 본 연구의 실험조건은  $N_R$ 이 0.5로 일정한 상태에서 설계변수의 변화와  $N_R$ 의 변화에 따른 혼합 및 질량분포특성을 고찰하기 위해 Table 2와 같은 값을 선정하였다.

$$N_R = \frac{1}{1 + \frac{\rho_o V_o^2 d_o}{\rho_f V_f^2 d_f}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{TCE} V_{TCE}^2 d_{TCE}}{\rho_{WATER} V_{WATER}^2 d_{WATER}}} \quad (3)$$

Table. 2 Experimental conditions

Parameter	Variables					
	C	Impingement Angle (Deg.)	Diameter (mm)		Jet Velocity (m/s)	
			Ori-H <sub>2</sub> O	Ori-TCE	Ori-H <sub>2</sub> O	Ori-TCE
Impingement Angle	1.0	30.0 60.0 90.0 120.0	0.98	0.98	19.3	16.0
Diameter Ratio	1.0	60.0	0.49 0.53 0.61 0.98 1.55 2.05	0.98	27.4 26.3 24.5 19.3 15.4 13.4	16.0
$N_R$	0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 2.00	60.0	0.98	0.98	27.4 22.3 19.3 17.3 15.8 14.6 13.7	16.0

채집기는 모든 실험조건에 대해 주입된 모의액의 95% 이상이 채집될 수 있도록 충돌점에서 수직하방으로 40mm 떨어진 곳에 평행하게 설치하였고, 실험시 분무초기 및 후기에 발생하는

천이현상이 혼합성능에 미치는 영향을 제거하고자, 얇은 알루미늄판을 사용하여 채집기 상부를 덮어 정상분무상태의 모의액을 채집하였다. 실험조건에 따라 모의액이 채집기 전체에 균일한 분포를 보이기도하며, 모의액이 한곳에 집중하는 현상 때문에 모든 조건에 대해 동일한 채집시간을 적용하지 못하고, 가능한 모든 조건에 대해 채집할 수 있는 최대시간을 적용하였고, 채집시간은 약 30 ~ 40 초였다. 사진 1은 시험에 사용된 채집기와 분사기이다.

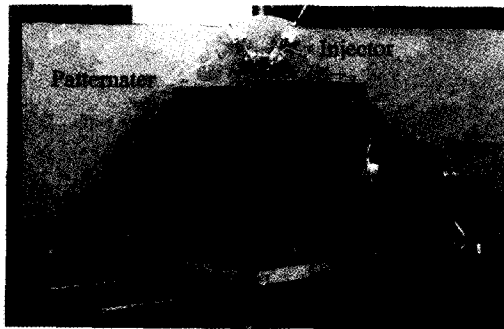


Photo. 1 Apparatus for measuring the mass distribution

#### 4. 결과 및 고찰

분사기에서 분사된 모의액의 총 질량유동율과 채집기에 채집된 모의액의 총 질량유동율의 비인 채집효율은 모든 실험조건에 대해 95% 이상의 결과를 나타내었다.

Fig. 3은 C를 1로 유지하면서 TCE 오리피스 지름 0.98mm, 물 오리피스 지름 0.98mm, TCE 분류속도 16m/s, 물 분류속도 19.3m/s, 충돌각 60° 인 조건에서 채집된 질량분포도로서, x-y축은 채집기 셀의 위치고, z축은 채집된 질량분율을 의미한다. 두 분류의 충돌면적이 같기 때문에 두 분류가 충돌후 정체점을 중심으로 모든 분류가 분사기 면에 수직인 방향으로 흐름방향을 변경하여 x-y축에 대해 대칭인 분포를 나타내었고, y축에 걸쳐 넓은 분포를 나타내었다.

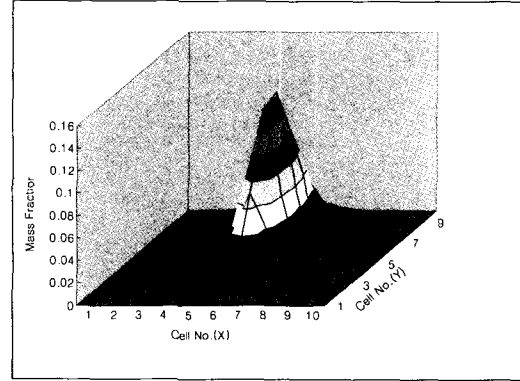


Fig. 3 Mass distribution formed by unlike impinging two jets

$$(d_{TCE}=0.98mm, d_{Water}=0.98mm \\ V_{TCE}=16m/s, V_{Water}=19.3m/s, 2\theta=60^\circ)$$

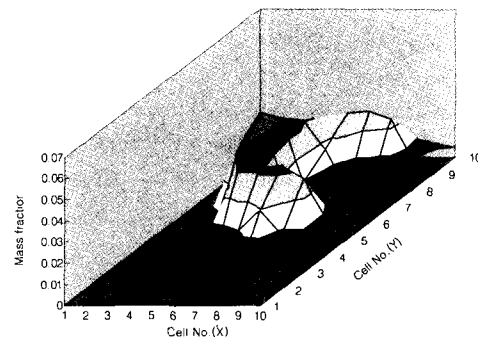


Fig. 4 Mass distribution formed by unlike impinging two jets

$$(d_{TCE}=0.98mm, d_{Water}=0.49mm \\ V_{TCE}=16m/s, V_{Water}=27.4m/s, 2\theta=60^\circ)$$

Fig. 4는 C를 1로 유지하면서 TCE 오리피스 지름 0.98mm, 물 오리피스 지름 0.49mm, TCE 분류속도 16m/s, 물 분류속도 27.4m/s, 충돌각 60° 인 조건에서 채집된 질량분포도로서, x-y축은 채집기 셀의 위치고, z축은 채집된 질량분율을 의미한다. 질량은 충돌점이 위치한 6번 셀 부분에서 가장 많이 채집되었고, y축에 대해서는 대칭적인 분포를 나타내고 있으나, x축에 대

해서는 비대칭적인 분포를 하고 있다. 이러한 현상은 두 분류가 충돌하는 충돌점에서 정체점이 형성되고, 충돌이 발생한 두 분류의 진행방향은 더 이상 초기 진행방향을 유지하지 못하고 정체점을 시작점으로 분사기 면에 대해 수직인 방향으로 변경되고, 또한 충돌하지 못한 부분은 초기 진행 방향을 그대로 유지하기 때문에 말발굽형상의 질량분포를 나타내었다.

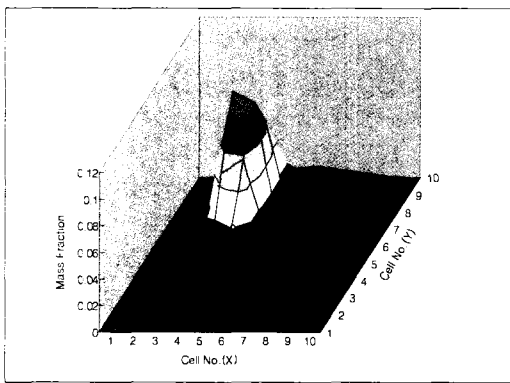


Fig. 5 Mass distribution formed by unlike impinging two jets

$$(d_{TCE}=0.98mm, d_{Water}=0.98mm, V_{TCE}=16m/s, V_{Water}=27.4m/s, 2\theta=60^\circ)$$

Fig. 5는 두 분류의 지름을 0.98mm, TCE 분류 속도 16m/s, 충돌각 60°로 일정하게 유지하면서, 물의 분류속도를 변화시킴으로써 C 변화가 질량분포 및 혼합도에 미치는 영향을 고찰하기 위한 실험중 물의 분류속도가 27.4m/s인 경우에 채집된 질량분포도이다.

두 분류의 충돌면적이 같기 때문에 Fig. 3에서와 같이 x-y축에 대칭인 형상을 보였으나, 채집기의 중심 위치에서 최대 분포를 나타내지 못하고, 운동량이 큰 분류의 초기 진행방향으로 편향되는 경향을 나타내었고, 작은 운동량의 분류는 큰 운동량의 분류에 의해 변형을 받아 좌우로 넓게 분포하는 경향을 보이면서 두 분류의 침투깊이는 작아졌다.

Fig. 6은 충돌각의 변화가 혼합특성에 미치는 선도로서, Table 2에서 충돌각이 변수인 경우에 대한 실험결과이다. 충돌각의 증가는 충돌

지를 증가시켜 미립화를 촉진시키는 것으로 보고되고 있으나, 반면에 x방향 운동량의 증가로 두 분류의 접촉시간이 감소하기 때문에 점점 분류의 초기 진행방향을 변경하지 못하는 양이 증가하여, 결국 침투깊이가 증가하였다. 따라서 두 분류는 서로를 통과하는 양이 증가하여 혼합도는 감소하였고, 질량은 넓은 범위에 걸쳐 균일한 분포를 보였다.

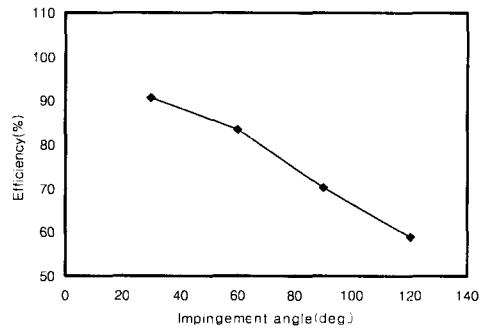


Fig. 6 The effect of impingement angle on mixing quality.

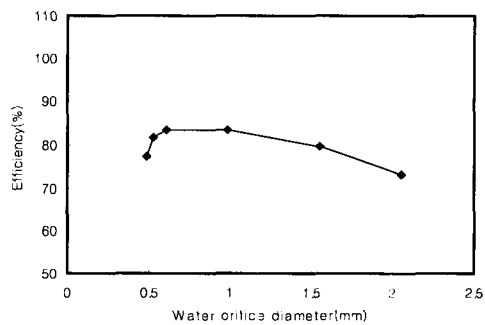


Fig. 7 The effect of orifice diameter ratio on mixing quality.

Fig. 7은 물 오리피스의 지름을 0.49mm~2.05mm로 변화하면서 두 분류의 C를 1로 일정하게 유지할 때 결과이다. 두 분류의 지름비가 1에서 멀어짐에 따라 Fig. 4에서와 같이 말 발

급같은 형상의 질량분포를 나타내면서 혼합도는 감소하였고, 두 오리피스 면적비(TCE/물)가 0.4~2.58 사이에서는 혼합성능의 변화가 거의 없었다. 또한 혼합도는 TCE/물 면적비와 물/TCE의 면적비가 같을 때 동일한 혼합성능을 나타내었다.

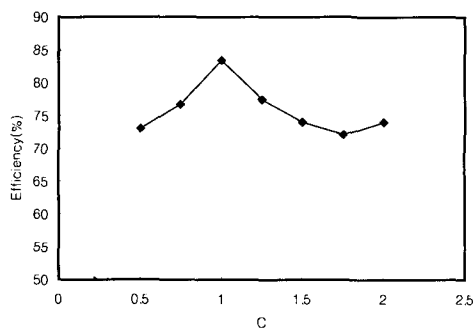


Fig. 8 The effect of momentum ratio on mixing quality.

Fig. 8은 두 분류의 지름을 0.98mm, 충돌각을 60°로 일정하게 유지하면서, 분류속도 변화에 의한 두 분류의 C가 혼합도에 미치는 결과로, C가 1에서 멀어짐에 따라 운동량이 작은 분류는 큰 분류를 전혀 침투하지 못하고 분류 표면을 따라 흘러 두 분류의 혼합도는 감소하였다.

#### 4. 결 론

이유체 충돌 분사기의 설계변수가 혼합성능 및 질량분포에 미치는 영향에 대한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 충돌각이 증가함에 따라 질량은 넓은 범위에 걸쳐 분포하나, 혼합효율은 감소하였다.
2. C가 1인 상태에서, 혼합효율은 두 분류의 오리피스 면적비가 0.4 ~ 2.58 범위내에서 거의 변화하지 않았다.

3. 두 분류의 면적이 동일한 상태에서, 운동량비의 변화는 혼합성능에 급격한 감소를 나타내었다. 따라서, 분사기를 통해 분사되는 두 유체의 설계혼합비 조건에서 최적의 혼합성능을 얻기 위해서는 운동량비를 1로 유지하면서 동일 오리피스 면적을 갖도록 설계해야하며, 그렇지 못할 경우에는 운동량비를 1로 일정하게 유지하면서 오리피스 면적비를 달리하는 설계방법이 혼합성능의 감소를 줄일 수 있는 방법이었다.

#### 참 고 문 헌

1. R. Dickerson, etc, "Correlation of spray injector parameters with rocket engine performance", AFRPL-TR-68-147, 1968.
2. 김 유등, "액체로켓엔진용 Unlike Triplet Impinging 인젝터(O-F-O)의 분무 및 연소성능에 관한 연구", 한국항공우주공학회지, 제26권 1호, 1997.
3. 김 유 등, "충돌형 Doublet 주입기의 설계변수에 따른 분무특성에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제22권 제6호, 1994.
4. Anon, "Liquid Rocket Engine Injectors", NASA SP 8089, 1976.
5. M.F. Heidmann and H.T. Foster, "Effect of impingement angle on drop-size distribution and spray pattern of two impinging water jets", NASA TN D-872, 1961.
6. E.A. Ibrahim, etc, "Impinging Jets Atomization", Phys. Fluids A, Vol. 3, No. 12, Dec. 1991.
7. G.P Sutton, "Rocket Propulsion elements", 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., 1992.
8. M.F. Heidmann, "Fluctuations in a Spray formed by Two Impinging Jets", Jour. Am. Rocket Soc., Vol. 22, 1952
9. A.Y. Falk, R.J. Burick, "Injector Design guidelines for gas/liquid propellant system", NASA CR-120968, 1973.