

< 논 문 >

액체 로켓용 충돌형 Triplet 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구

박성영* · 김선진* · 박승운* · 김유**

(1995년 3월 18일 접수)

A Study on Spray Characteristics of the Triplet Impinging Stream Type Injector for Liquid Rocket

Sung-Young Park, Seon-Jin Kim, Seung-Woon Park and Yoo Kim

Key Words : Rocket (로켓), Atomization (미립화), Jet (분류), Injector (인젝터), Spray Characteristics (분무 특성)

Abstract

An experimental investigation has been carried out to examine the influence of injector design variables and operating conditions on the resultant drop size for triplet impinging streams injectors. The variables studied in this investigation are pressure drop, impinging angle, orifice length to diameter ratio, and impinging point distance. Droplet-size data are obtained using water as the propellant simulant by Malvern Particle Analyzer System. Drop size decreases with increasing impinging angle and pressure drop while other injector parameters remain constant at the same point. But it is found that there is no noticeable droplet-size change which results from change in orifice length to diameter ratio or impinging point distance within the investigated range.

기 호 설 명

A : 면적 (mm²)

C_d : 유량계수

d : 오리피스 직경 (mm)

F : 추력 (N)

g : 중력 가속도 (m/sec²)

I_{sp} : 비추력 (sec)

Li : 충돌점으로부터 인젝터면까지의 거리 (mm)

L/d : 오리피스 길이 대 직경비

ṁ : 추진제 질량 유동률 (g/sec)

N : 오리피스 수

ΔP : 압력 강하량 (압력차) (MPa)

r : 혼합비

r_p : 압력비

SMD : Sauter mean diameter (μm)

그리스문자

α : 충돌각 (degree)

ρ : 추진제 밀도 (kg/m³)

하첨자

o : 산화제

f : 연료

1. 서 론

최근 국내 인공위성 정책과 더불어 추진분야에 대한 관심이 고조되고 있으며 이와 관련된 기술적, 이론적 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 본

*충남대학교 대학원 기계공학과

**충남대학교 기계공학과

연구에서는 액체 로켓의 여러 가지 구성요소 중 적정량의 액체 추진제를 연소실내로 분사하여 미립화 및 혼합을 이루는 구성요소로, 액체 로켓의 성능 및 연소 안정성에 큰 영향을 미치는 인젝터(Injector)에 대한 연구를 수행하였다.

액체 추진 로켓용 인젝터에는 용도에 따라 여러 형태의 인젝터가 사용되고 있으나,^(1~4) 본 연구에서는 액체 로켓 엔진의 인젝터로서 가장 많이 활용되고 있는 충돌형 인젝터를 그 대상으로 하였으며, 이 충돌형 인젝터는 추진재끼리 직접 충돌시켜 그 충돌 에너지에 의해 추진제가 미립화와 혼합을 이루는 형태로 충돌후에 추진제는 부채꼴 모양의 액막을 이루며 이 액막이 성장하면서 미립화가 이루어지게 된다.⁽⁵⁾

충돌형 인젝터는 충돌 방법에 따라 연료와 산화제가 충돌하는 이류체 충돌형(unlike impinging type)과 연료는 연료끼리, 산화제는 산화제끼리 충돌하는 동류체 충돌형(like impinging type)으로 분류되며, 또한 충돌하는 분류의 개수에 따라 이중(doublet), 삼중(triplet), 오중(pentad) 충돌형 방식 등의 형태로 구분된다.^(1~4) 인젝터의 최적 설계를 위해서는 연소실험(hot test)과 비연소실험(cold-flow test)의 두 가지 방법이 사용되고 있다. 연소 실험방법은 연소중에 측정되는 각종특성치들의 효율과 연소불안정(instability) 등을 실제적으로 확인할 수 있으며, 비 연소 실험방법은 simulant의 분무를 통해 미립자의 크기, 질량분포도 및 액막의 분열현상 등을 규명하여 실제 추진제의 연소실험에서 발생될 수 있는 각종현상들을 예측한다.⁽⁶⁾ 분무의 가장 중요한 관점은 미립자를 많이 포함하는 것과 넓은 범위로 균일하게 분산되는 것이다. 액체 분류의 분리(disintegration)와 미립화 구조에 대한 이론적 연구는 Rayleigh⁽⁶⁾가 표면장력의 영향하에 있는 액체 기둥의 붕괴에 대하여 연구한 이래 많은 연구자들에 의해 액체의 분열과정이 연구되어 왔다. 특히 Schweitzer⁽⁷⁾는 비록 Reynolds 수가 동일한 경우라 할 지라도 압력 강하량이 클 경우에는 분열 길이가 짧아지게 되며, 수많은 미립자로 분열하는 개념에서 미립화는 공기와의 마찰과정을 통하지 않고는 생성될 수 없다고 보고하였다. 충돌분류에서의 액적크기는 분사조건과 orifice의 기하학적 형상에 영향을 받게 된다. Kuykendal⁽⁸⁾은 Doublet injector를 이용하여 orifice의 직경, 충돌각 및 분류의 속도가 미립화

액적크기에 어떤 상관관계가 있음을 실험적으로 밝힌바 있으며, Zajac⁽⁹⁾은 미립화에 영향을 주는 요소로서 injector의 분류특성(jet characteristics), 동압비(dynamic pressure ratio), 추진제의 혼합성(miscibility) 및 injector의 기하학적 설계변수를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 세 개의 오리피스스를 통한 이류체 충돌형 인젝터의 비연소실험으로 인젝터의 기하학적 설계변수 및 운용조건이 분무액체의 미립화에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 인젝터의 설계

인젝터를 설계하기 위해서는 먼저 인젝터가 사용될 로켓의 규격을 설정해야 한다. 연료로 에틸 알코올(C₂H₅OH)을, 산화제로 액체산소(LO₂)를 사용하고, 추력(F) 22.24 N, 연소실압력(Pc) 1.723 MPa인 액체 로켓을 기준으로하여 인젝터를 설계하였다.

2.1 공급 유량의 결정

인젝터를 통해 공급되어야 할 최적의 유량을 결정하기 위해 범용 연소 프로그램인 C. E. C. 코드를 사용하여 혼합비의 변화에 따른 특성속도 곡선을 계산하였으며, 계산결과 혼합비 r=1.5에서 최대 특성속도 1720m/s, 이때의 비추력 I_{sp}는 240.15 sec를 보였다. 따라서 목표추력과 비추력을 근거로 시스템에 공급되어야 할 최적의 유량은 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = \frac{F}{I_{sp}g} = 9.45 \text{ (g/s)} \quad (1)$$

총 질량유동률과 혼합비의 관계($r = \dot{m}_o / \dot{m}_i$, $\dot{m} = \dot{m}_i + \dot{m}_o$)를 이용하여 각각의 오리피스에서의 유량은 식 (2)로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_o &= \frac{r\dot{m}}{1+r} = 5.67 \text{ (g/s)} \\ \dot{m}_i &= \frac{\dot{m}}{1+r} = 3.78 \text{ (g/s)} \end{aligned} \quad (2)$$

추진제 공급을 위한 필요 오리피스 직경은 베르누이 방정식과 연속방정식을 이용하여 다음과 같은 관계식으로부터 얻을 수 있다.

$$d_o = \sqrt{\frac{4\dot{m}_o}{N_o\pi C_d \sqrt{2\rho_o \Delta P_o}}} \approx 0.45 \text{ (mm)}$$

$$d_f = \sqrt{\frac{4\dot{m}_f}{N_f \pi C_d \sqrt{2\rho_f \Delta P_f}}} \approx 0.55 \text{ (mm)} \quad (3)$$

여기서 N_o 는 산화제 오리피스 수로 2개이고, N_f 는 연료 오리피스 수로 1개이다. 식 (3)에서 유량계수(Cd)의 값은 유동 프로그램인 FLUENT를 사용하여 계산한 0.74의 값을 사용하였고, 액체추진제 로켓엔진에서의 압력강하량(ΔP)은 일반적으로 연소실압력의 15%~20%를^(1~2,4) 적용하므로 본 연구에서는 17%를 적용하였다.

2.2 설계 변수의 선정

설계변수로써 충돌각, 오리피스 길이 대 직경비 및 충돌점거리를 택하였으며, 운용변수로써 압력강하량을 적용하여 총 27개의 인젝터를 설계 및 제작하였다. 표 1은 본 연구에서 적용된 변수들의 값을 나타내고 있으며 일반적으로 액체 로켓에서 사용하는 범위에서 선정하였다.

충돌형 인젝터에서 충돌각의 변화는 분무특성에 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 일반적으로 60°~90°의 범위에서 사용되는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서도 충돌각을 60°, 74°, 90°로 설계하였다. 오리피스 길이 대 직경비는 유동의 형태를 결정하는 인젝터 설계의 중요한 무차원 변수로써 충돌형 인젝터에서 일반적으로 사용하는 범위는 2~5 정도를 사용한다. 충돌점 거리는

인젝터 면으로부터 세 세트가 충돌하는 곳까지의 거리이며, 일반적으로 충돌형 인젝터의 경우 오리피스 지름의 2~5배 정도의 범위를 사용한다. 충돌점거리는 연소시의 특성과 추진제를 공급하는 Manifold의 설계를 같이 고려해 주어야 한다. 본 연구에서는 이를 고려하여 연료 오리피스 지름의 3, 4, 5배로 설계하였다. 압력강하량은 인젝터 전면과 후면의 압력차이를 말하며, 연소 불안정성을 고려하여 15%~20% 사이의 값을 사용하는 것이 일반적이다.^(1~2,4)

Fig. 1은 인젝터의 세부설계도로, 가운데 오리피스가 연료 오리피스이고, 바깥쪽의 두 오리피스가 산화제 오리피스로 연료 오리피스를 사이에 두고 대칭을 이루며 인젝터 후면의 일직선상에 위치하게 됨으로써 생성되는 액막의 기울어짐을 방지하도록 하였다. 인젝터 전면의 진입구 지름을 Sealing과 가공이 허용하는 범위내에서 가능한 한 크게 설계함으로써 진입구의 유동이 오리피스의 유동에 미치는 영향을 최소화하도록 하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치의 구성

실험장치는 액체공급 및 분무를 위한 장치와 인젝터를 통과하여 분무된 미립자의 측정 및 처리를 위한 광학 측정장치의 두 부분으로 구성된다.

3.1.1 액체 공급 및 분무장치

이 장치는 물탱크에서 분무 장치까지 물을 공급하는 액체 공급 장치와 공급된 물을 인젝터를 통해 원활히 분사되도록 하는 분무장치로 구성하였다. 액체 공급장치는 질소 가스에 의한 가압방식과 펌프 가압방식의 두 가지 방법을 조합해서 사용하였

Table 1 Design and operating variables

Parameter	Symbol	Unit	Value
Impinging angle	α	deg	60°, 74°, 90°
Orifice length to diameter ratio	L/d	-	3, 4, 5
Impinging length	L_i	mm	3d _i , 4d _i , 5d _i
Pressure drop	ΔP_o	kg/cm ²	3, 4, 5

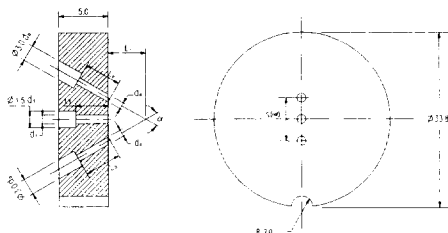


Fig. 1 Detailed dimensions for triplet injector

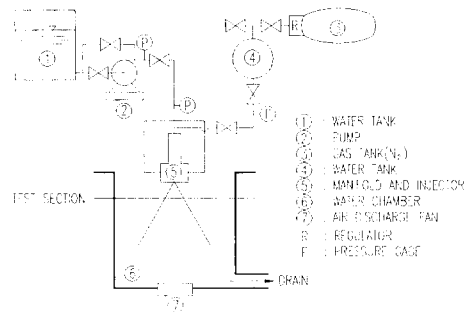


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

으며, 분무장치는 인젝터와 인젝터를 고정시키고 물을 유도하는 Manifold로 구성되어 있다.

Fig. 2는 액체공급장치 구성의 개략도로, 수조①에서 공급된 물이 펌프②를 통해서 인젝터의 산화재 오리피스로, 가압용 질소탱크③의 가스가 물탱크④의 물을 가압하여 인젝터의 연료 오리피스로 분사된다. ⑤는 인젝터와 Manifold이고, 인젝터를

통해 나온 물은 Test Section을 거쳐 ⑥의 Water Chamber로 들어가고 이 물은 배수구를 거쳐 배출된다. ⑦은 배기 팬으로 일회의 실험이 종료될 때마다 공기중에 부유하고 있는 미립자를 배출시킨다.

Fig. 3은 인젝터와 Manifold의 상세도이다. Manifold의 주된 기능은 연소실내로 추진제를 균

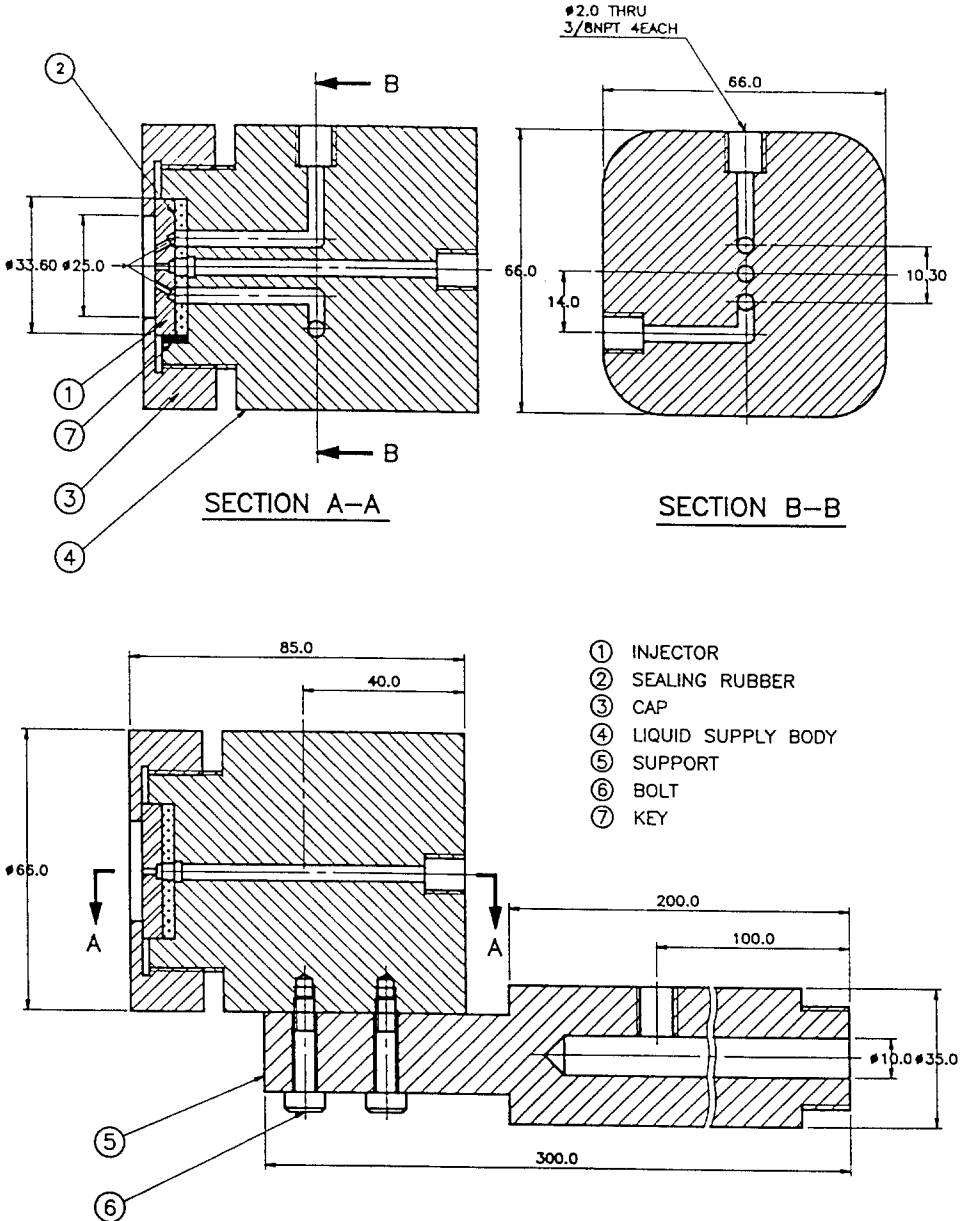


Fig. 3 Experimental device for water spray (unit : mm)

일하게 공급하는 것이며, Manifold 내의 추진제 유동속도는 가능한 작게하고, 최소한의 저항으로 인젝터의 내부유동에 영향을 주지않고 산화제와 연료가 섞이지 않도록 했다. Fig. 3을 보면 ③은 Cap으로 여러 개의 인젝터의 교체가 용이하도록 나사식으로 만들었으며, ⑦은 인젝터의 측정 방향을 고정시키는 키로, 키를 박은 것은 인젝터의 실험시 방향에 따라 분무되는 각도와 퍼지는 폭이 다르게 나타나므로 측정방향을 일정하게 하여 동일한 실험 조건을 유지하기 위함이다.

3.1.2 광학 측정 장치

인젝터에 의해 생성된 미립자의 크기를 측정하기 위해 He-Ne 레이저광 발생기를 이용하였고, 미립자를 통과한 후 산란된 레이저광은 Receiver에 연결된 Malvern 미립자 해석기 2600에 의해 해석된다. 지름 10.0 mm의 레이저광은 형성되는 액막에 직각으로 투사되며, 이때 얻어지는 자료는 전용 컴퓨터에 내장된 해석기 전용 소프트웨어에 의해 처리된다. 분무 액적의 크기를 고려하여 5.8 ~ 564.0 μm 사이의 미립자 크기를 측정할 수 있는 초점거리 300mm 렌즈를 사용하여 미립자의 평균 지름 중의 하나인 SMD를 측정하였다.

3.2 실험 방법

본 실험에서는 분무액체로써 물을 사용하였으며, 설계된 인젝터에 대해 산화제 쪽 압력강하량(ΔP_o)을 3, 4, 5 kg_f/cm^2 로, 연료 쪽 압력강하량(ΔP_f)을 2, 3, 4 kg_f/cm^2 로 조정하여 각 인젝터의 SMD를 측정하고 사진을 찍었다. 이때 인젝터를 통해 나온 분무가 안정된 상태에 들어갈 수 있도록 일정 시간이 지난 뒤 데이터 획득을 시작하였다. 측정 위치는 인젝터 면으로부터 75mm 떨어진 중앙 위치에서 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 총돌각에 의한 영향

Fig. 4는 압력비($r_p = \Delta P_o / \Delta P_f$)가 1.3으로 총돌각이 60°, 74°, 90°로 증가함에 따라 변화하는 액막의 모양을 역광을 이용하여 사진기로 촬영한 것이다.

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 액막이 깨져나가는 현상을 관찰할 수 있었으며, 압력강하량이 증

가하고 총돌각이 커질수록 액막의 폭이 넓어지고 길이가 짧아지며 미립화의 진행이 가속됨을 볼 수 있다. 60°에서 액막내에 작은 구멍이 생기고 이것이 성장하면서 미립화가 이루어지는 perforated 모드와 74°, 90°에서 wave가 발생하고 이것에 의해 미립화가 되는 wave 모드를 관찰할 수 있었으며, 이 같은 모드들이 동시에 발생하여 미립화가 이루어지는 것을 사진상으로 볼 수 있다. 또한 각 총돌각에서 Ligament가 액적으로 성장해 나가는 것도 잘 볼 수 있다.

이런 총돌각에 의한 영향은 Fig. 5에서도 잘 나타나고 있는데 총돌각이 증가함에 따라 미립자의 크기를 나타내는 SMD가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 60°에서 74° 사이에서는 SMD가 급격한 감소를 보이고 74°에서 90° 사이에서는 압력강하량이 증가할수록 완만히 감소함을 보이고 있다. 이는 제트의 총돌 모멘텀에 의해서 액체 추진제를 미립화시키는 총돌형 인젝터의 경우에 총돌각의 증가는 총돌 모멘텀의 증가를 의미하고, 이 모멘텀의 증가는 미립화를 촉진하는 요인이 된다. 또한 총돌 모멘텀이 일정량 이상으로 증가하면 미립자의 크기에 미치는 영향이 점차 줄어든다.

Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 종합하면 총돌각의 증가에 따라 액막의 길이는 짧아지고 분산각은 넓어지며 SMD는 작아짐을 알 수 있다.

4.2 L/d 에 의한 영향

Fig. 6은 압력강하량이 3, 4, 5 kg_f/cm^2 으로, L/d가 3, 4, 5로 변함에 따른 액막의 분열현상을 보여주고 있으며, 압력강하량의 증가에 따른 영향은 뚜렷이 나타나지만 L/d에 따른 영향은 거의 볼 수 없다. 이러한 결과는 Fig. 7에서도 볼 수 있는 바와 같이 총돌각이 증가함에 따라 SMD는 작아지고 있으나 L/d에 대한 SMD의 변화량은 서로 밀접되어 특정한 경향을 보이고 있지 않다.

원형 오리피스스의 조합으로 구성된 인젝터의 경우 인젝터 내의 유동이 Full flow를 생성해내는 최소의 L/d가 가장 이상적인데, 이것은 L/d가 커질수록 유동에 의한 손실이 커지고, 이 손실이 커질수록 총돌 모멘텀을 약화시켜 미립화를 방해하기 때문이다. 본 연구에서 수행한 L/d의 범위(3, 4, 5)에서는 이런 손실량의 차이가 작기 때문에 미립화에 미치는 영향도 미소한 것으로 사료된다.

따라서 Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 종합하면 L/d

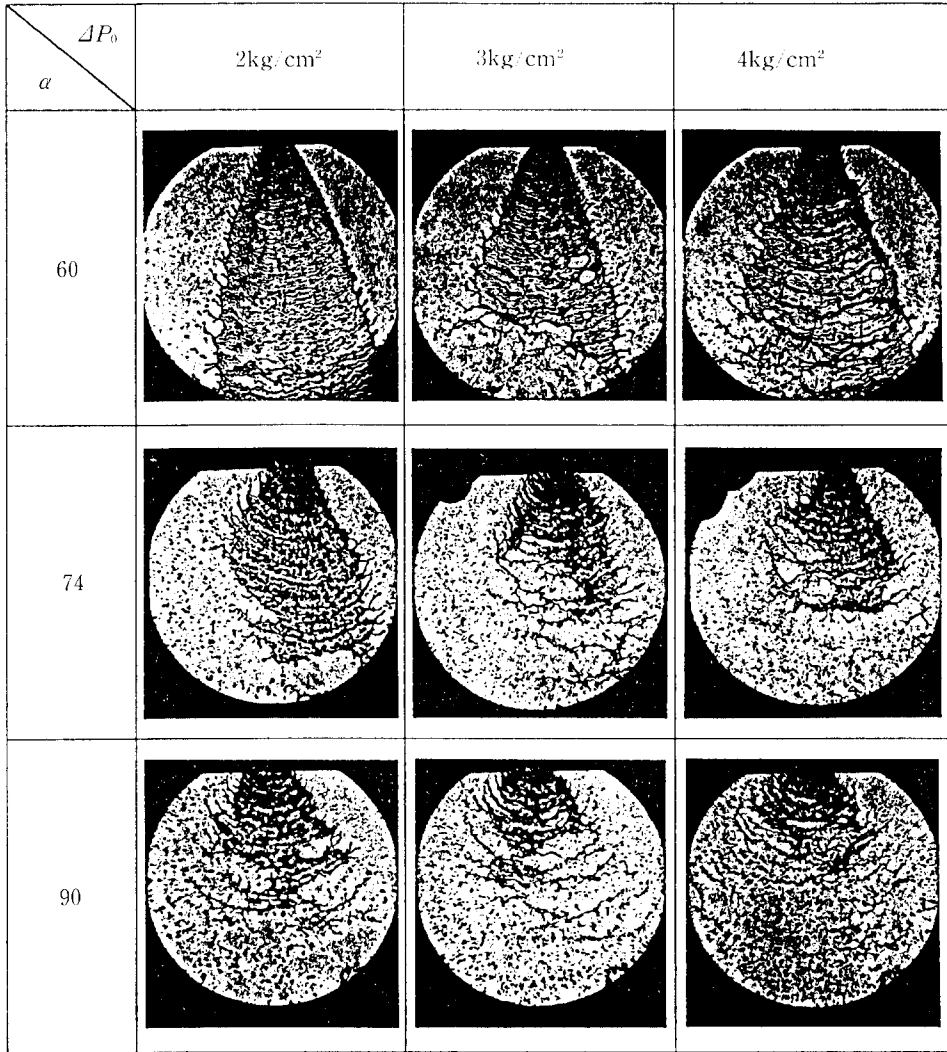
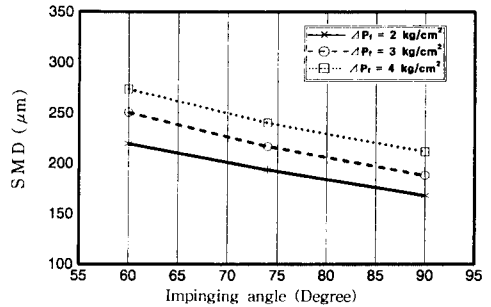


Fig. 4 Formation of the sheet at the variations of pressure and impinging angle after the impingement of the jets. ($L/d = 4, L_c = 5d_c, r_c = 1.3$)

는 분무되는 액박의 모양과 미립자의 크기에 미치는 영향이 미소하다.

4.3 충돌점 거리에 의한 영향

Fig. 8은 충돌점 거리의 변화에 따른 SMD를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 충돌점의 변화에 따른 SMD가 거의 일정한 수준을 보이고 있다. 충돌점거리도 L/d 와 마찬가지로, 충돌점과 인젝터 면 사이의 거리가 멀어지면 손실항으로 미립화에 영향을 미친다고 생각되나 연구 범위 ($Li = 3d_c, 4d_c, 5d_c$) 내에서의 영향은 미소한 것으로 사료된다.



(a) $\Delta P_0 = 3\text{Kg/cm}^2$

Fig. 5 Continued

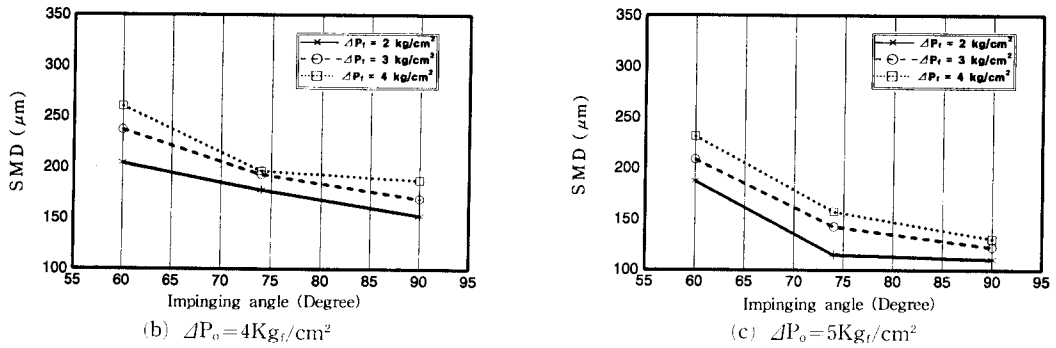


Fig. 5 SMD as a function of impinging angle and pressure drop ($L/d=3$, $L_t=4d_t$, $x=75\text{mm}$)

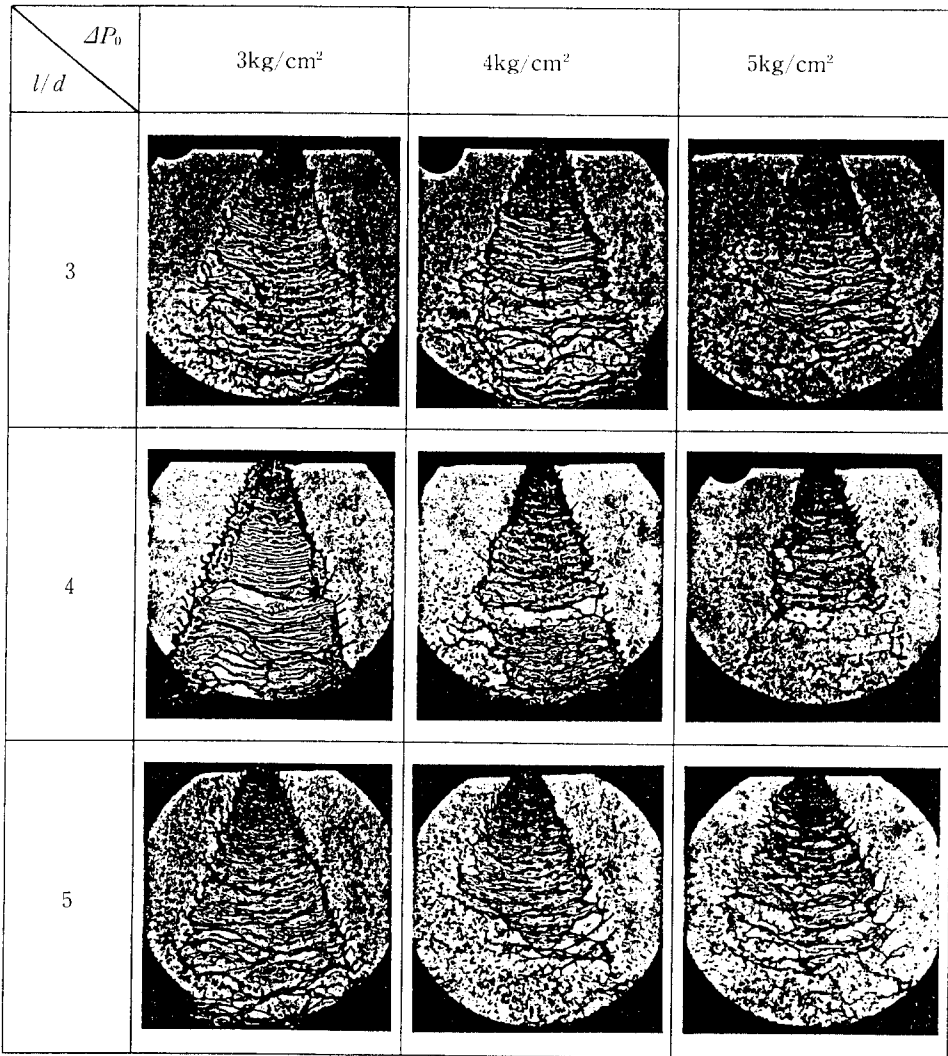


Fig. 6 Formation of the sheet at the variations of pressure and L/d after the impingement of the jets. ($\alpha=60^\circ$, $L_t=5d_t$, $r_p=1.0$)

Fig. 8에서 충돌점 거리가 $3d_r$ 이고 연료 오리피스
 의 압력이 $4\text{kg}_f/\text{cm}^2$ 일때 SMD가 크게 나타난 것
 은 충돌점 거리의 영향이라기 보다는 낮은 압력비
 ($\Delta P_o/\Delta P_i$)로 인한 액막 길이의 증가 때문으로 사
 료된다.

4.4 압력강하량에 의한 영향

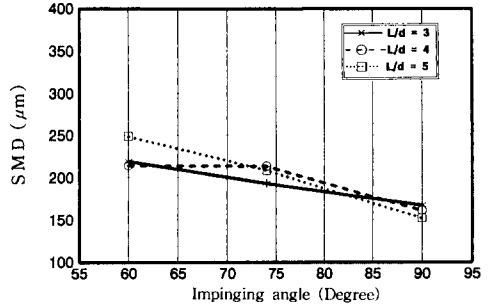
Fig. 4 및 Fig. 6에서 연료와 산화제 오리피스의
 압력강하량이 증가함에 따라 액막의 길이가 짧아지
 고, 미립화 현상이 급격히 진행됨을 볼 수 있다.
 이러한 현상은 압력강하량이 증가됨에 따라 액막에
 미치는 공기 역학적인 영향이 증대될뿐만 아니라
 분류의 충돌시 충돌력을 증대시킴으로써 미립자 생
 성을 촉진하기 때문으로 사료된다.

Fig. 5 (a) (b) (c)에서 산화제 오리피스의 압력강
 하량이 증가할수록 전체적으로 SMD가 작아짐을
 볼 수 있다. Fig. 7 (a) (b) (c)에서는 연료 오리피
 스의 압력강하량이 커질수록 전체적인 SMD가 올
 라가는 경향을 보이고 있다.

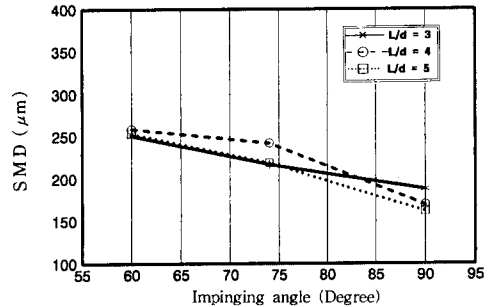
Fig. 9는 각 연료 및 산화제 오리피스의 압력강
 하량이 SMD에 미치는 영향을 충돌각 별로 보여주
 고 있다. Fig. 9에서 산화제 오리피스의 압력강하
 량(ΔP_o)이 일정하게 유지될 때 연료 오리피스의
 압력강하량(ΔP_i)의 감소가 SMD를 감소시키고,
 반대로 연료 오리피스의 압력강하량(ΔP_i)이 일
 정하게 유지될 때는 산화제 오리피스의 압력강하
 량(ΔP_o)의 감소는 SMD를 증가시킴을 볼 수 있다.
 이러한 현상은 양 측면(d_o)에서의 분류의 세기에
 비해 중앙(d_r)의 분류의 세기가 커짐으로써 조합된
 분류의 분열(breakup)이 지연되기 때문으로 판단
 된다.

4.5 축방향 거리에 의한 영향

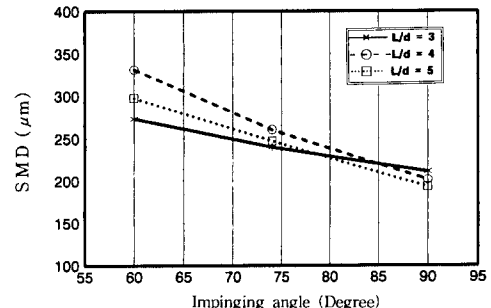
Fig. 10은 인젝터의 충돌각 변화에 따른 축방
 향 거리에서의 액적 크기를 나타내고 있다. 그림에서
 보는 바와 같이 인젝터 면에서의 거리가 멀어질수
 록 액적 크기는 작아지며, 또한 충돌각이 커질수록
 액적 크기는 작아지는 경향을 보이고 있다. 그림
 에서 74° 와 90° 에서의 액적 크기가 거의 동일하며
 60° 와는 큰 차이를 보이고 있다. 74° 와 90° 의 인
 젝터에서 인젝터 면으로부터의 거리가 멀어지면 어느
 한계 ($\text{SMD}=80\sim 90\mu\text{m}$, $x=175\text{mm}$)까지는 액적크
 기가 감소하다가, 이 한계를 넘어서면 액적 크기가
 약간 증가하는 경향을 보이는데, 이는 충돌 모멘텀



(a) $\Delta P_i = 2\text{Kg}_f/\text{cm}^2$



(b) $\Delta P_i = 3\text{Kg}_f/\text{cm}^2$



(c) $\Delta P_i = 4\text{Kg}_f/\text{cm}^2$

Fig. 7 SMD as a function of impinging angle and L/d . ($L_i = 4d$, $\Delta P_o = 4\text{Kg}_f/\text{cm}^2$, $x = 75\text{mm}$)

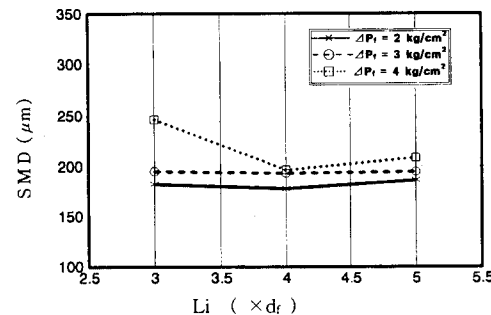


Fig. 8 SMD as a function of L_i and pressure drop of fuel side. ($\Delta P_o = 4\text{Kg}_f/\text{cm}^2$, $\theta = 74^\circ$, $L/d = 3$, $x = 75\text{mm}$)

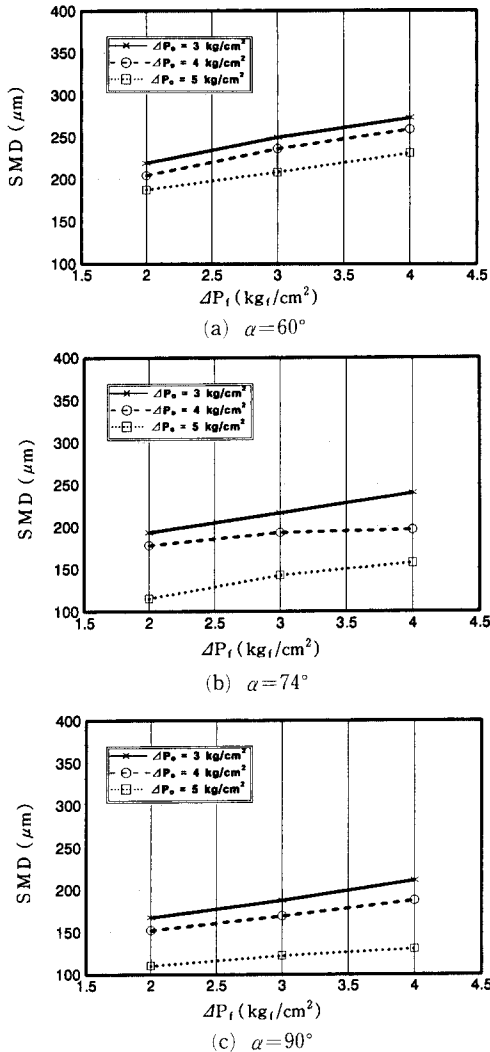


Fig. 9 SMD as a function of fuel side pressure drop and oxidizer side pressure drop. ($L_i = 4d_f$, $L/d = 3$, $x = 75\text{mm}$)

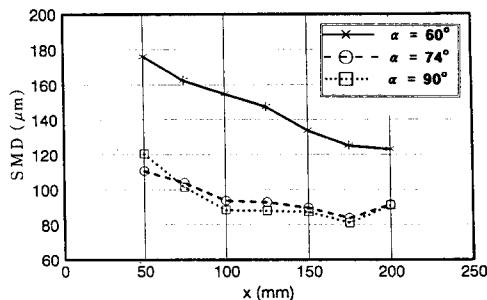


Fig. 10 SMD as a function of axial distance. ($L/d = 3$, $L_i = 4d_f$, $r_p = 1.3$, $\Delta P_o = 4\text{kgf/cm}^2$)

을 상실한 액적들이 다시 응집하기 때문으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 총돌형 Unlike-Triplet 인젝터를 대상으로 인젝터의 주요 설계변수와 운용조건이 액적의 미립화에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인젝터에서의 압력강하량(ΔP)과 총돌각(α)은 분무 액체의 미립화에 큰 영향을 미치며, 압력강하량비($\Delta P_o/\Delta P_f$)가 커질수록, 총돌각이 커질수록 액적의 크기는 작아지는 경향을 보인다.

2. 인젝터의 오리피스 길이 대 직경비(L/d)와 총돌점 거리(L_i)는 본 연구의 범위($L/d = 3, 4, 5$; $L_i = 3d_f, 4d_f, 5d_f$)내에서는 분무 액체의 미립화에 거의 영향을 주지 않는다.

3. 인젝터에서 형성되는 액막의 길이와 폭은 미립자의 크기와 관계되며 실험 범위내에서 액막의 길이가 짧을수록, 폭이 넓을수록 작은 크기의 미립자를 생성한다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단이 지원하는 '94 지방대 육성과제(과제번호: 02-E-0334)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 인젝터의 가공을 도와주신 한화 그룹 창원공장 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Huzel, D. K. and Huang, 1992, *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, AIAA, Washington, pp. 104~115.
- (2) Marcel Barrere, 1960, *Rocket Propulsion*, Elsevier Publication Co., Redland California, pp. 369~403.
- (3) Sutton, G. P. and Ross, D. M., 1976, *Rocket Propulsion Elements*, John Wiley and Sons, Inc., USA, pp. 286~295.
- (4) 홍용식, 1990, 우주추진공학, 청문각, 서울,

pp. 229~235.

- (5) Lefebvre, A. H., 1989, *Atomization and Spray*, Hemisphere Publication Co, pp. 27~73.
- (6) Lord Rayleigh, 1878, "On the Instability of Jets," *Proc. Math., London Math. Soc.*, Vol. 10, p. 4.
- (7) Schweitzer, P. H., 1975, "Mechanism of Disintegration of Liquid Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, part 3, pp. 477~495.
- (8) Kuykendal, W. B., 1970, "The Effects of Injector Design Variables On Average Drop Size for Impinging Jets," AFRPL-TR-70-53.
- (9) Zajac, L. J., 1970, "Correlation of Spray Drop Size Distribution and Injector Variables," NASA JPL-R-8455, Rocketdyne.