

# 액체로켓용 충돌형 인젝터의 연소성능에 관한 연구

김 유, 김선진, 정세용 (충남대학교)

## 1. 서 론

액체로켓은 산화제와 연료를 별도의 탱크에 액상으로 저장하고 인젝터를 통하여 연소실에 공급되고 연소가스가 노즐을 통해 분출함으로써 추력을 얻는 추진기관이다.

액체로켓의 인젝터는 추진체의 내열성을 보장하고, 설계추력을 얻을 수 있으며 안정하고 효율적인 연소가 이루어지도록 연료와 산화제를 미립화 및 혼합시키는 요소이다.[1~2]

이와 관련된 국내 연구로는 김[3]은 액체로켓에 적용할 수 있는 분무현상과 연소이론을 연구하였으며, 김[4], 김[5], 김[6]등은 기체/기체, 기체/액체로켓 및 충돌형 doublet 인젝터의 분무 특성을 연구하였다. 국외 연구로 Santoro[7]등은 swirl coaxial 인젝터의 연소효율은 혼합비가 3~166이고 연소압이 140~350 psi 범위에서 92~100%라고 보고하였으며, Elverum[8]등은 충돌형 인젝터의 최적 혼합비분포에 관한 연구를 수행하였고, Rupe[9]는 충돌형 인젝터의 운용조건과 혼합비와의 상관관계를 연구하였다.

본 연구에서 인젝터는 일반적으로 액체로켓에서 많이 사용되는 충돌형 인젝터 중에서 unlike impinging streams triplet 및 doublet 인젝터를 선정하였다.

LOX/Ethyl alcohol을 추진제로 연소실험을 통하여 인젝터의 충돌각, 연소실 특성길이, 인젝터 형상이 연소효율에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 인젝터 설계

본 연구에 사용될 액체로켓의 설계는 학교차원의 연구용으로 공급장치의 한계 및 측정장치를 고려하여 추력(F)을 2.3 lbf, 연소실 압력(Pc)을 110 psia로 선정하였다.

산화제인 액체산소는 탱크로부터 유량계와 각

종 밸브를 통해 인젝터 manifold에 도달하는 동안 완전히 기화되어 기체상태로 인젝터를 통하여 연소실에 공급되므로 기체/액체용 충돌형 인젝터를 단일(Uni-element)형태로 설계하였다.

### 2-1 성능변수

#### - 특성속도 ( $C^*$ )

특성속도는 추진체의 연소성능을 나타내는 변수로 실험을 통하여 추진체의 에너지 준위와 인젝터 및 연소실 설계의 적합도를 측정하는 값이다.

$$C^* = \frac{P_c A_t}{m} \quad (1)$$

#### - 연소효율 ( $\eta$ )

인젝터의 연소효율은 일정한 크기의 노즐목면적에서 실험으로 측정된 공급유량과 연소압력으로 계산된 특성속도( $C^*_{exp}$ )의 값과 이론적으로 얻어진 특성속도( $C^*_{th}$ )의 값의 비를 나타낸다.

$$\eta = \frac{C^*_{exp}}{C^*_{th}} \quad (2)$$

#### - 비추력 ( $I_{sp}$ )

비추력은 추진체 성능 수준을 나타내는 변수로 연소가스의 중량유량당 추력을 의미한다.

$$I_{sp} = \frac{F}{mg} \quad (3)$$

### 2-2 인젝터 설계

본 연구에서는 단일 인젝터의 연소특성을 연구하기 위하여 산화제와 연료가 직접 충돌하는 unlike impinging streams type의 triplet 및 doublet 인젝터를 선정하였다. Triplet 인젝터는 가운데 오리피스로 산화제가 공급되고 일정한 각을 이룬 양쪽 오리피스로 연료를 공급하는

FOF형태를 선정하였다.

설계를 위하여 대표적인 연소프로그램인 CEC (Chemical Equilibrium Calculations) code[10]를 이용하여 요구되는 연소실 압력에서 기체산소와 액체 에틸알코올이 연소될때 최대 비추력을 나타내는 혼합비를 구하였고, 이러한 조건에서의 연소가스 물성치는 table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of mixed propellant

Chamber gas temperature (°R)	5650.2
Molecular weight (lb/lbmol)	21.819
Specific heat ratio (γ)	1.1267
Specific impulse (I <sub>sp</sub> )	206.92
Mixture ratio (r)	1.50

설계추력을 얻을 수 있도록 식 (3)을 이용하여 공급유량을 구하고, 혼합비와의 관계로부터 산화제 및 연료의 질량유량을 구하였다.

$$\dot{m} = F / I_{sp} g = 0.01125 \text{ (lb/sec)} \quad (4)$$

$$\dot{m}_o = 0.00675 \text{ (lb/sec)} \quad (5)$$

$$\dot{m}_f = 0.0045 \text{ (lb/sec)} \quad (6)$$

요구되는 연료유량을 공급하기 위한 오리피스 면적을 구하기 위해 압력강하량은 연소안정성을 고려하여 연소실 압력의 15%인 16.5 psi로 선정하였고, 유량계수(C<sub>d</sub>)는 문헌[2]을 참고하고 실험[6]을 통한 0.68을 선정하여 연료 오리피스의 면적을 구하였다

$$A_f = \frac{\dot{m}_f}{C_d \sqrt{2 \rho \Delta P}} \quad (7)$$

산화제인 기체상태의 산소를 공급하기 위한 오리피스의 면적은 식 (8)을 이용하였다. 여기에서 P<sub>1</sub> 과 T<sub>1</sub>은 산화제의 공급압력과 온도를 나타낸다.

$$A_o = \frac{\dot{m}_o}{C_d P_1 \sqrt{\frac{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}{R T_1}}} \quad (8)$$

Table 2. Design values of the injector

Injector type	Triplet	Doublet
Impinging angle (θ)	60°, 90°	90°
Impinging length (L <sub>i</sub> )	4d <sub>f</sub>	4d <sub>f</sub>
Length to diameter ratio (L/d)	4	4
Oxidizer orifice diameter (in)	0.039	0.039
Fuel orifice diameter (in)	0.018	0.024

Fig 1. Drawing of the doublet injector

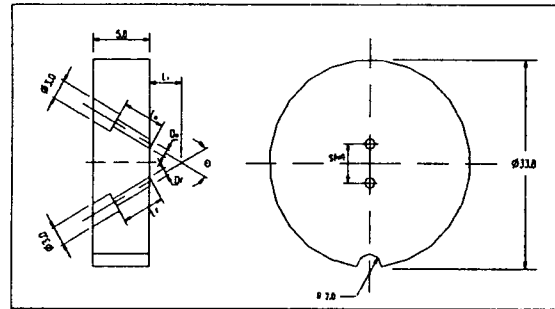
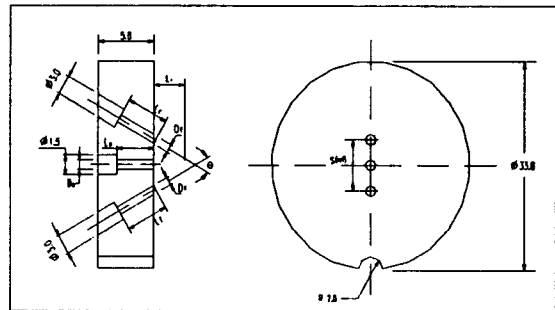


Fig 2. Drawing of the triplet injector



충돌형 인젝터의 중요한 설계변수인 충돌각, 충돌점거리와 오리피스 길이대 지름비는 액체로켓에서 사용되고 있는 범위에서 선정하여 인젝터를 설계 및 제작하였다.

Table 2는 인젝터의 설계값이고, fig 1과 fig 2는 doublet과 triplet 인젝터의 설계도면이다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3-1 실험장치

연소실험장치는 추력실, 추진제 공급장치, 배관, 자동조절장치 그리고 측정장치로 구성되어

있다.

연소실 특성길이는 문헌[1]에서 추천하는 범위에서 49.21 in, 85.82 in를 선정하였고, 지름은 0.5 in 원통형으로 설계하였다. 노즐은 문헌[1][11]에서 추천하는 범위인 수축반각을 30°, 확산반각을 15°로 하였고, 제작이 용이한 원뿔형으로 설계하였다. 추진제 공급은 고압의 기체질소로 연료를 가압하는 압축가스공급방식을 사용하였다.

배관은 1/4 in 스테인레스관을 사용하였고, 역화방지를 위하여 check valve, 자동개폐를 위하여 전기 solenoid valve와 air actuated solenoid valve를 사용하였다. 연소후 엔진 내부의 잔류 추진제와 연소가스를 제거할 수 있도록 기체질소의 정화(purge)라인을 첨가하였다. 자동조절장치는 timer를 이용하여 점화시간, 연소시간 및 정화시간등을 순차적으로 제어하도록 되어있다. 측정장치는 압력, 추력, 유량의 신호가 센서로부터 계측되고, 신호처리장치를 거쳐 자료분석 프로그램인 Global Lab이 내장되어 있는 PC에 전송되어 자료의 저장 및 분석을 하였다.

Fig 3은 연소실험을 위한 배관도이다.

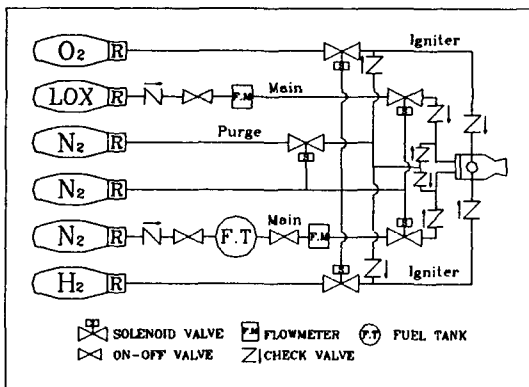


Fig 3. Pipeline for hot firing test

### 3-2 실험방법

인젝터의 총들각, 연소실 특성길이, 인젝터 형상이 연소특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 혼합비가 1.5인 조건에서 연소실험을 하였다.

연소실험시간은 자동조절장치를 이용하여 점화시간 1초, 주연소시간은 연소압이 정상상태에 도달하여 데이터 획득에 필요한 시간을 고려하여 5초정도, 연소실 냉각 및 잔류 추진제의 제

거를 위한 정화시간은 충분히 하였다.

정확한 자료를 얻기위하여 동일조건에서 연소실험을 5회이상 반복하여 수행하였다. 연소실험에서는 추진제 유량, 추력, 연소실 압력을 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1 연소실 압력선도 해석

Fig 4는 연소시간에 따른 연소실 압력을 나타낸다. 0.5~1초구간은 점화기의 연소로 인한 연소실 압력상승을 나타내며, 1~2초구간은 점화기와 주추진제가 동시에 연소가 이루어지는 중복(overlap)구간으로 주추진제만의 연소가 이루어지는 경우보다 높은 압력을 보이고 있다. 2~5초구간은 점화기의 연소가 끝나고 주추진제만이 연소가 이루어지고 있는 상태로 안정된 연소가 이루어지는 주연소시간이므로 연소압력을 측정하는 구간이 된다. 이러한 연소시간에 따른 연소실 압력선도는 시스템의 자동조절장치에서 설정된 시간과 잘 일치함을 보이고 있다.

### 4-2 설계변수에 대한 영향

Fig 5는 triplet 인젝터에서 총들각의 변화에 따른 연소실 특성길이에 대하여 비추력( $I_{sp}$ )을 나타내고 있으며, Fig 6은 연소실 압력( $P_c$ )을 나타낸다.

점들을 동일한 조건에서 실험한 3개의 데이터를 나타내며 선들은 그 평균값을 나타낸다.

총들각의 증가에 따라서 비추력 및 연소실 압력은 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

연소실 특성길이 증가에 따라서 비추력 및 연소실 압력은 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

총들각이 클수록 미립화의 경향이 우수하다고 보고된 경향과 일치하고 있으며 연소장에서 충분한 연소시간이 이루어질수록 연소성능이 우수하다고 보고된 경향과 일치하였으나 크지 않게 나타났다.

Fig 7은 triplet 인젝터의 연소효율( $\eta$ )을 나타낸다. 실험범위에서 unlike impinging streams FOF type triplet 인젝터의 연소효율은 78~82% 범위임을 알 수 있다.

#### 4-3 인젝터 형상 비교

Fig 8은 동일한 조건( $\theta = 90^\circ$ ,  $L^* = 49.21$  in)에서 doublet 과 triplet 인젝터의 연소효율을 나타낸다. Doublet 인젝터의 연소효율은 66~70% 범위이고, triplet 인젝터는 78~81% 범위를 보이고 있다. Triplet 인젝터가 doublet인젝터보다 평균 12% 정도 높은 연소효율을 나타내고 있다. 동일한 조건에서 연소실험시 triplet 인젝터가 doublet 인젝터보다 안정한 연소가 이루어지고 있으며, 액적의 미립화 및 혼합의 현상이 우수하다고 생각된다.

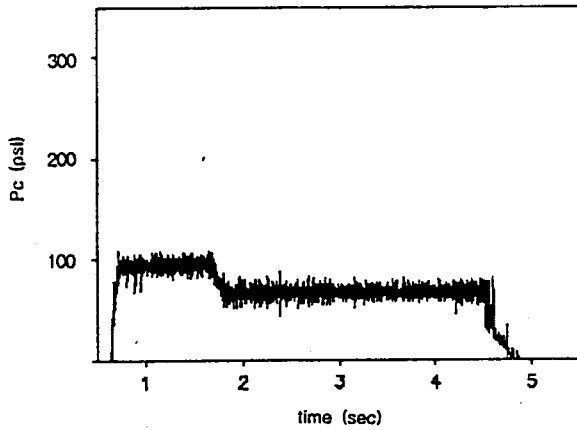


Fig 4. Variation of Pc with time

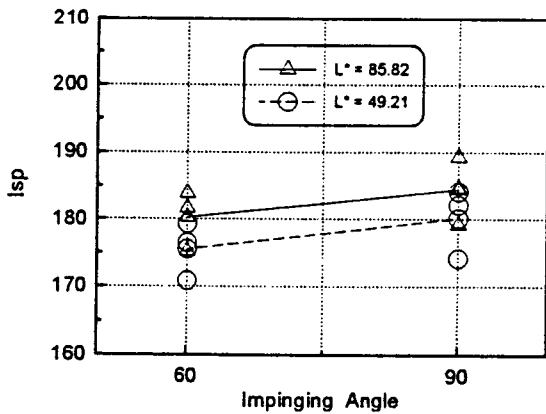


Fig 5. Variation of Isp with impinging angle

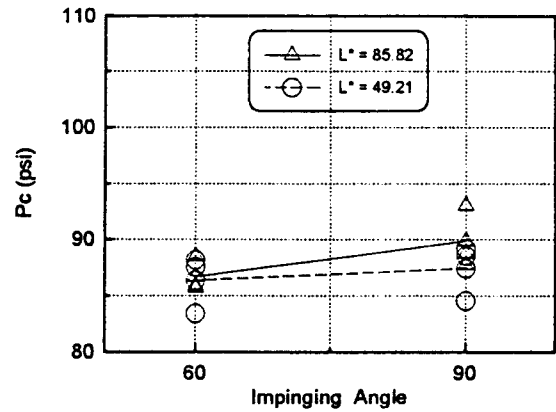


Fig 6. Variation of Pc with impinging angle

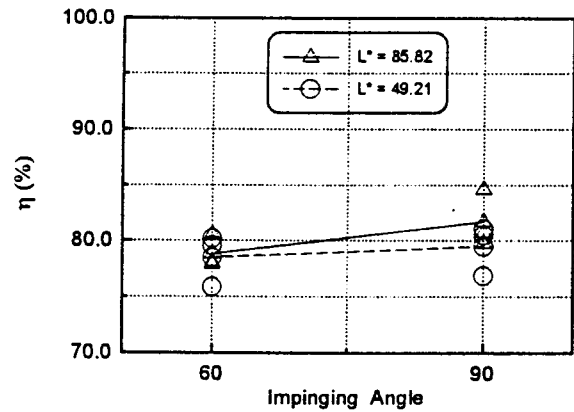


Fig 7. Variation of  $\eta$  with impinging angle

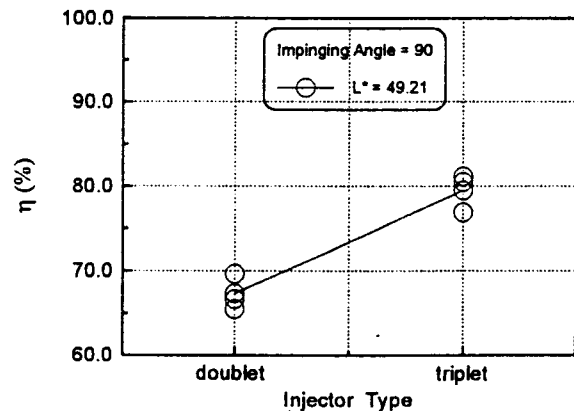


Fig 8. Variation of  $\eta$  with injector type ( $\theta = 90^\circ$ ,  $L^* = 49.21$  in)

## 5. 결 론

본 연구에서는 LOX/Ethyl alcohol을 추진제로 하는 추력 2.3 lbf, 연소실 압력 110 psia의 액체 로켓에서 충돌형 인젝터의 연소특성을 고찰하기 위해 연소실험을 하였다. 실험조건에서 triplet 인젝터는 78~82% 정도, doublet 인젝터는 66~70%정도의 연소효율을 보였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충돌형 triplet 인젝터가 doublet 인젝터보다 연소효율이 우수하다.
- 2) 실험범위 내에서 충돌형 인젝터의 충돌각이 증가할수록, 연소실 특성길이가 증가할수록 연소성능은 약간 증가한다.
- 3) 동일성능의 지상연소 실험에서 액체로켓용 인젝터로는 충돌각이 90°인 Triplet형을 사용하며 연소실 특성길이는 가능한 긴 것을 추천한다.

## 참 고 문 헌

1. Huzel D. K. and Huang D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines", AIAA, 1992
2. Anon, "Liquid Rocket Engine Injectors", NASA, 1976
3. 김유, "액체연료의 분무식 연소이론에 관한 연구", 국방과학연구소, ATRC-421-93785, 1994
4. 김유, 박승운, 오세광, 박정배, "한국항공우주학회지", 제21권, 제4호, 1993, pp.93-102
5. 김유, 박승운, 김선진, 한재섭, "한국항공우주학회지", 제22권, 제6호, 1994, pp.38-44
6. 김유, 박승운, 김선진, 정해승, "한국항공우주학회지", 제22권, 제6호, 1994, pp.8-14
7. Santoro R. J, Pal S. and Rahman, "Swirl Coaxial Atomization: Cold-Flow and Hot-fire Experiments", AIAA 95-0381, 1995
8. Elverum G. W. and Morey T., "Criteria for Optimum Mixture Ratio Distribution Using Several Types of Impinging Stream Injector Elements", Memorandum 30-5, Jet Propulsion Lab., Calif. Inst. Tech., 1959
9. Rupe, J. H., "A Correlation Between the Dynamic Properties of a Pair of Impinging Streams and the Uniformity of Mixture Ratio Distribution in the Resulting Spray", Prog. Rep. 20-209, Jet Propulsion Lab., Calif. Inst. Tech., 1956
10. Gordon S. and McBride B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions Rocket Performance Incident and Reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonations", NASA Lewis Research Center, 1976
11. Hyde J. C. and Gill G. S., "Liquid Rocket Engine Nozzles", NASA, 1976