F-O-O-F 충돌형 injector의 분무특성 및 혼합성능에 관한 실험적 연구

이광진* · 문덕용* · 김 유*

An Experimental Study on the Characteristics of Spray Pattern and the Mixing Performance of Unlike-impinging Split Triplet Injector(F-O-O-F)

K.J. Lee* · D.Y. Moon* · Y. Kim*

ABSTRACT

Mixing efficiency of the unlike impinging split triplet injector(FOOF type) were measured to investigate the effect of the momentum ratio variation. H_2O/Kerosene were used as a propellant simulant. The maximum mixing efficiency occured at the momentum ratio 1.5 (total mixture ratio 1.89). Calculated mixing efficiency of real propellant LOX/Kerosene showed similar trend but maximum efficiency of characteristic velocity occurs at the momentum ratio 2.0(total mixture ratio 2.17). Although there exist a little discrepancy between calculated mixing efficiency based on simulant cold test and hot fire test results, this calculated mixing efficiency can be used to predict hot fire mixing efficiency.

초 록

H_2O/Kerosene을 사용하여 Unlike 충돌형 인젝터(FOOF형)에서 산화제와 연료의 운동량비 변화에 따른 혼합효율을 측정하였다. 모의 추진제의 운동량비 1.5(총혼합비 1.89)에서 혼합성능은 최대 값을 나타내었으며 모의 추진제의 실험결과는 실제 추진제인 LOX/Kerosene에 적용하여 혼합특성속도 효율을 예측하였다. 연구 결과 혼합특성속도 효율은 운동량비 2.0에서 최대 값을 나타내었다. 이러한 예측은 실제 연소실험을 통하여 얻어진 연소효율과 약간의 차이는 있으나 초기설계자료로서 충분한 가치가 있는 것으로 판단된다.

기 호 설 명

c^* : Characteristic velocity (m/s)
v : Jet velocity (m/s)
d : Orifice diameter (mm)
E_m : Mixing efficiency

*충남대학교 기계공학과(Chungnam National University, Dept. of Mechanical Eng.)

m : Mass flow (g)
MR : Momentum Ratio
ρ : Density (kg/m^3)
ηc^* : Efficiency of characteristic velocity

첨 자

l : Local
t : Total
o : Oxidizer
f : Fuel

1. 서 론

액체로켓엔진의 추진체계의 성능은 추진제를 연소실내로 분사하는 인젝터의 성능에 크게 의존한다. 추진제의 혼합상태에 따라 연소성능을 예측 할 수 있고 또 불안정연소 국부적인 Burnout등 여러 발생 가능한 현상을 예측 할 수 있는 인젝터의 혼합성능 실험은 매우 중요하다.

본 연구에서는 Unlike 충돌형 인젝터(OFO형)에 대한 기존의 연구[1],[2]에 이어 항공우주연구소에서 설계되어 실제 액체로켓의 엔진에 사용될 Unlike 충돌형 인젝터(FOOF형)에 대해서 비연소실험(Cold Flow Tests)중의 하나인 혼합성능 실험을 수행하였다.

모의 추진제 H_2O/Kerosene을 사용하여 Unlike 충돌형 인젝터(FOOF형)에서 산화제와 연료의 운동량비 변화에 따른 혼합효율을 측정하였다. 모의 추진제의 실험결과는 실제 추진제인 LOX/Kerosene에 적용하여 혼합특성속도효율을 예측하였다.

2. 이론적 배경

인젝터의 비 연소시의 분무 특성을 연구하는 것을 목적으로 한 시험을 비 연소시험이라 한다. 비 연소시험은 크게 인젝터의 혼합효율을 측정하는 것을 목적으로 한 혼합 시험[3][4]과 분무된 추진제의 입경과 속도를 측정하는 것을 목적으로 한 PDPA 시험으로 분류된다. 인젝터의 비연소시험중 혼합성능 시험은 로켓엔진 인젝터의 연소성능을 예측하거나 또는 연소시험시 발생할 수 있는 문제점들을 진단할 수 있다.

비연소 혼합시험으로부터 인젝터에 대한 평가는 추진제의 혼합효율, 혼합특성속도 및 혼합특성속도 효율로서 진행된다. 이 세 가지 평가기준의 계산은 모두 Patternator로부터 채집된 모의 추진제의 국부 질량분포와 국부 혼합비 분포를 기초로 한다.

2.1. 혼합효율 Em

혼합효율은 인젝터로부터 분사되는 모의 추진제의 국부혼합비가 총 혼합비로부터 이탈된 정도 즉 분무의 혼합균일도를 나타내는 척도로서 다음과 같이 정의된다.

$$E_m = [1 - \frac{\int_0^{MF(r=R)} (R-r)dMF}{\int_0^R dr} - \frac{\int_{MF(r=R)}^1 (R-r)dMF}{\int_1^R dr}] \times 100\% \quad (1)$$

여기서 MF는 적분변수이다.

인젝터에서 분사된 모의 추진제는 격자셀로 된 Patternator상에서 채집되기 때문에 식(1)을 이산화된 식으로 고치면 다음과 같다.

$$E_m = [1 - \sum_1^n \frac{M_{sl} \cdot (R-r)}{M_{st} \cdot R} - \sum_1^{\bar{n}} \frac{M_{sl} \cdot (R-\bar{r})}{M_{st} \cdot (R-1)}] \times 100\% \quad (2)$$

여기서 E_m은 0~100%의 범위를 나타내는데 E_m=0%는 혼합이 전혀 일어나지 않은 상태이고 E_m=100%는 전 영역에서의 국부혼합비가 총 혼합비와 완전히 같은 이상적인 상황을 나타낸다.

혼합효율 E_m과 밀접한 관계를 갖고 있는 것은 혼합비 빈도분포 또는 누적질량분포(CMF)이다.

2.2 혼합특성속도 c^*_{mix} 및 효율 $\eta_{c^*_{mix}}$

혼합특성속도 c^*_{mix}은 비 연소실험 결과로부터 실제 연소시의 추진제의 특성속도를 예측하는데 이용된다.

연소실험을 거치지 않고 연소성능을 제일 간단하게 예측하는 방법은 연소과정을 연소성능에 지배적인 영향을 주는 초기 혼합과정과 증발과정으로 분리하여 연소성능은 각 과정에서의 효율의 적이라고 가정하는 것이다. 즉

$$\eta c^* = \eta c^*_{mix} \cdot \eta c^*_{vap} \tag{3}$$

혼합특성속도효율은 모의추진제의 비 연소실험 결과로부터 얻을 수 있으며 증발특성속도효율은 연소실험으로부터 측정할 수 있는데 여기에서는 $\eta c^*_{vap} = 100\%$로 가정하였다. 이때 특성속도효율은 혼합특성속도와 같기 때문에 혼합특성속도효율 ηc^*_{mix}는 연소성능을 예측하는데 매우 중요하다. 모의추진제의 혼합비로부터 추진제의 혼합비로의 환산은 산화제와 연료의 운동량비가 모의추진제를 사용하였을 때의 운동량비와 같다고 하면 다음과 같다.

$$\frac{M_o}{M_f} = \sqrt{\frac{\rho_o \cdot \rho_{sf}}{\rho_f \cdot \rho_{so}}} \cdot \frac{M_{so}}{M_{sf}} \tag{4}$$

식(4)로부터 총 혼합비와 국부혼합비의 환산을 진행할 수 있으며, 이때 혼합특성속도 c^*_{mix}는 다음과 같다.

$$c^*_{mix} = \frac{\sum_1^k c^*_{theo} \cdot M_l}{M_t} \tag{5}$$

여기서 c^*_{theo}는 추진제의 국부혼합비로부터 얻은 특성속도효율로서 연소 범용프로그램인 CEC 코드를 이용하여 구하였다. M_l은 매 실린더에서 측정된 모의 산화제와 모의 연료의 질량의 합으로서 국부질량이라고 하며 M_t는 국부질량들의 총 합이다.

혼합특성속도효율은 총 혼합비일때의 특성속도효율 c^*_{theo}과 혼합특성속도 c^*_{mix}의 비이다. 즉

$$\eta c^*_{mix} = \frac{c^*_{mix}}{c^*_{theo}} \times 100\% \tag{6}$$

3. 인 젝 터

인젝터는 두 개의 안쪽 산화제 분류와 두 개의 외부 연료분류를 충돌시켜 혼합 및 미립화시키는 Unlike Impinging Split Triplet Injector을 사용하였다. 이 인젝터는 안쪽의 산화제분류를 둘로 나누어줌으로써 연료 오리피스와의 면적비가 적정치를 유지하도록 제작된 것이다.

인젝터의 설계시 결정하여야 할 변수는 연료와 산화제 측의 오리피스 직경, 충돌점거리, 충돌각 등이다. 오리피스 직경은 설계 추력을 내는데 필요한 질량유동율, 유량계수 그리고 CEC코드로 부터 얻은 주어진 연소실 압력에서 최대 특성속도를 낼 수 있는 산화제와 연료의 혼합비 등의 상관관계로부터 얻을 수 있다.

본 실험에 사용된 인젝터는 Uni-element로서 사양은 Table 1 과 Fig 1에 잘 나타나 있다.

Table 1. Design values of Injector

Type	Unlike Split Triplet Impinging streams FOOF type
Impinging Length(Li)	10.4 mm
Impinging Angle(2θ)	60°
Oxi. orifice dia.	2.2 mm
Fuel orifice dia.	1.6 mm

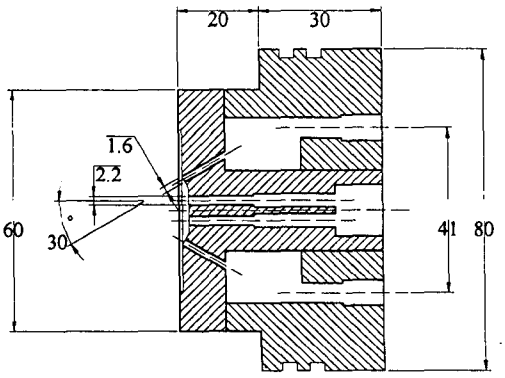


Fig 1. Design of injector

충돌점 거리는 오리피스면으로부터 제트가 충돌하는 곳까지의 거리이며, 일반적으로 충돌형 인젝터의 경우에 오리피스 지름의 2배에서 5배(Li=2d~5d)정도의 범위를 사용한다. 충돌점 거리가 길 경우 충돌 후의 분열길이가 길어지게 되어 분무액체의 미립화 촉진에 좋은 영향을 주지 못하며, 짧을 경우에는 가공상의 문제가 발생한다. 따라서 충돌점 거리는 일반적으로 연소시의 특성, 가공의 어려움 및 추진제를 공급하는 Manifold의 설계를 고려하여 제작된다.

충돌각은 충돌형 인제터에서 오리피스를 통해 분사된 제트가 만나는 각도를 말하며, 이는 추진제의 후류 유동, 혼합의 균일성, 분무의 미립화 길이, 생성 미립자의 크기 및 형성되는 액막(sheet)의 폭 등과 깊은 상관 관계를 가진다. 충돌각이 크면 혼합된 추진제의 후류 유동이 증가해 인젝터 면을 Burnout 시키는 결과를 초래하나 액적 크기는 작아진다. 충돌각이 작아지면 혼합정도는 증가한다. Impinging 인젝터에서 일반적으로 사용되는 충돌각 범위은 60~90° 이다.

본 실험에서는 인젝터를 고정시키기 위해서 높낮이 변화가 가능하고 수평이동이 가능한 지지대를 사용하였고 흔들림이나 충격에의한 위치 변동을 막기 위해 소형 바이스를 이용해서 고정하였다.

4. 실험장치 및 방법

Unlike Impinging Split Triplet Injector (FOOF형) 의 혼합성능을 측정하기 위한 실험장치는 모의 추진제의 공급장치와 분무된 모의 추진제를 채집하는 patternator 그리고 자료처리장치로 나눌 수 있다.

4.1 실험장치

실제 추진제의 취급상 어려운 점으로 본 비연소 혼합 실험에서는 모의 추진제인 H_2O/kerosene을 사용하였다. 비연소 실험장치의 구성도는 Fig 2와 같다.

모의 추진제는 질소 가스로 가압 되어 인젝터에 공급된다. 모의 산화제인 물은 120 리터 용량의 고압용 Tank에 연료인 kerosene는 50리터 용량의

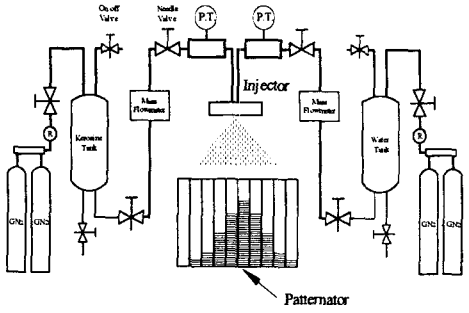


Fig 2. Schematic Diagram of Simulant feed System

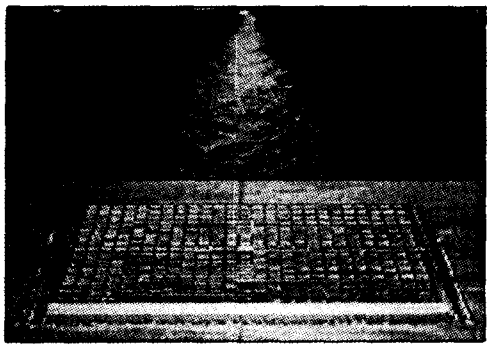


Photo 1. Spray of simulant propellents

고압용 Tank에 저장하였다. 각각의 고압탱크에 저장된 물과 Kerosene은 질소 가스로 가압 되어 수동 On/Off 벨브를 거쳐 유량계를 지나 인젝터로 공급된다..

Photo 1은 인젝터로부터 분무되는 모의 추진제와 patternator의 셀을 보여주고 있으며 그 구조는 격자셀, 유도판, mass 실린더로 이루어져 있다. 격자셀은 가로 25개 세로 15개로 구성되며 한 개의 격자셀 크기는 가로 세로 1cm×1cm로 만들어졌다. 셀과 셀을 구분하는 벽면은 추진제가 이곳에 부딛쳐서 발생할 수 있는 오차를 최소화하고자 얇게 제작되었다.

Fig 3은 자료 처리 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 모의 추진제의 공급유량은 Coriolis의 측정원리를 이용한 Micro motion사의 유량계(model : DO40H-SS-200)를 사용하였고 압력은 Strain gauge type 압력센서를 이용하였다.

모의 추진제의 주입 압력과 유량은 자료처리를

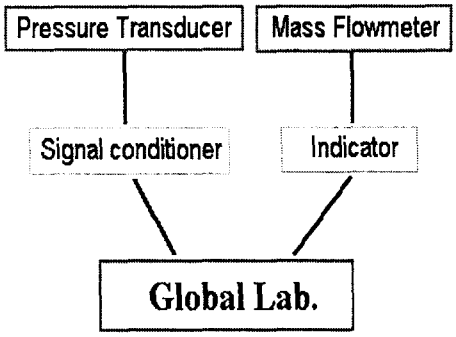


Fig 3. Schematic Diagram of data acquisition system

위한 소프트웨어(Global Lab)가 내장된 PC에 채널당 1,000Hz의 Sampling rate로 저장된다.

4.2 실험방법

충돌형 인젝터에서는 일반적으로 운동량비로 인젝터의 상관관계를 나타내기 때문에 혼합효율, 혼합특성속도 및 혼합특성속도 효율에 관한 실험데이타를 산화제와 연료의 운동량비로 나타내었다.

식 (7)은 산화제와 연료의 운동량비를 나타낸다.

$$MR=\frac{N_o m_{so} v_{so}}{N_f m_{sf} v_{sf}}=\left(\frac{N_f}{N_o}\right)\left(\frac{m_{so}}{m_{sf}}\right)^2\left(\frac{\rho_{sf}}{\rho_{so}}\right)\left(\frac{d_{sf}}{d_{so}}\right)^2 \quad (7)$$

Table 2는 실험조건이다.

혼합비분포, 및 유량분포를 측정하기 위한 채집위치는 Uni-element실험에서는 문제가 되지 않아 채집에 편리한 위치를 선택하면 되지만 Two 혹은 Multi elements 인젝터와 같이 서로 간섭이 있는 경우에는 채집위치가 문제된다. Nurick[5]은 엔진내부에서의 분무범위가 주위 연소가스 유체에 제한되는 정도를 1차원 증발모델과 단일 액적궤적 계산으로부터 추정하여 경사지게 분사된 평균입자직경의 액적궤적이 인젝터로부터 축방향과 평형하게 되는 위치를 Cold flow 실험에서의 채집위치로 결정하였다[5].

Table 2. Conditions of experiment

simulant propellant	Oxidizer : water
	Fuel : kerosene
Total mass flow rate	260 g/s
Momentum ratio	(0.99~5.00)
Collecting time	6 sec
Collecting distance	182 mm

본 실험에서는 PDPA 실험이 수반되지 않은 관계로 실험의 목적에 벗어나지 않는 조건하에서 채집효율과 채집시 Patternator 셀간의 질식현상을 고려하여 인젝터면으로부터 18.2cm 떨어진 곳을 채집위치로 결정하였다. 또 인젝터와 Patternator 셀과의 중심을 일치시키기 위해 산화제쪽 오리피스와 Patternator 셀의 중심을 맞추어서 그 위치를 원점으로 정하였다. 가로는 X축으로, 세로는 Y축으로, 그리고 추진제 분무의 반대방향을 Z축으로 놓았다. 각각의 셀에 채집된 kerosene과 H_2O의 혼합 유량이 다르기 때문에 본 실험장치의 mass 실린더외에 적은 양을 측정하기 위한 10㎖의 mass실린더를 사용하였다. mass 실린더에 채집된 Kerosene과 물은 밀도차에 의해 분층을 이루며 밀도가 큰 H_2O가 밑에 있고 밀도가 작은 Kerosene이 위에 있기 때문에 H_2O의 체적과 전체 체적을 측정하여 국부에서의 Kerosene의 질량을 얻을 수 있었다.

5. 실험결과 및 고찰

모의 추진제의 운동량비 변화에 따른 질량 분포 및 혼합효율을 고찰하고 이를 토대로 실제 추진제인 LOX/Kerosene의 혼합특성속도효율을 예측하였다.

5.1 H_2O/Kerosene을 모의추진제로 사용할 때의 충돌현상과 질량분포

Photo 2는 FOOF 충돌형 인젝터에서 분무된 추진제의 충돌현상을 보여준다. 중심의 산화제분류는 1차로 측면의 연료와 충돌을 하게되고 다시 한번 2차 충돌을 하게된다. 1차 충동로 미립화 및 혼합된 추진제는 다시 한번 2차 충돌을 하게 되면서 본격적인 혼합 이루어진다.

최종혼합효율에 큰 영향을 미치는 이 2차 충돌각

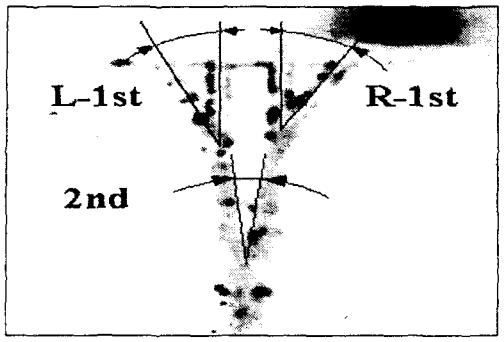
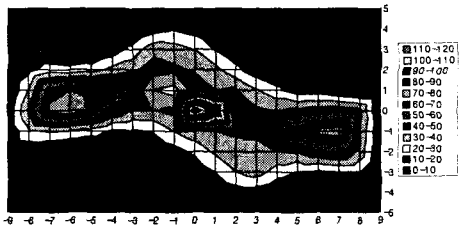
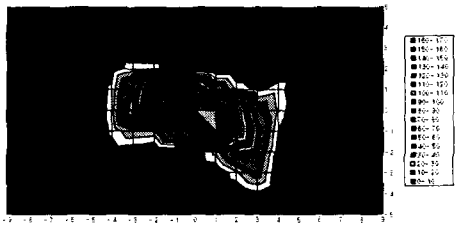


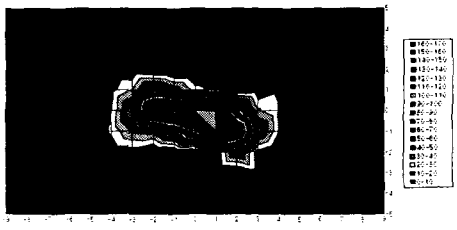
Photo 2. Impinging Angle of Unlike Impinging Split Triplet Injector



(a) MR = 0.83



(b) MR = 2.21



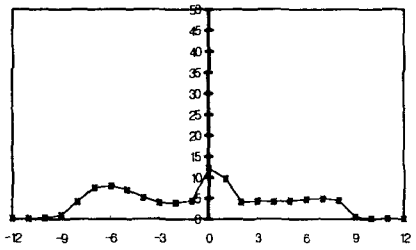
(c) MR = 4.79

Fig 4. Mass distribution

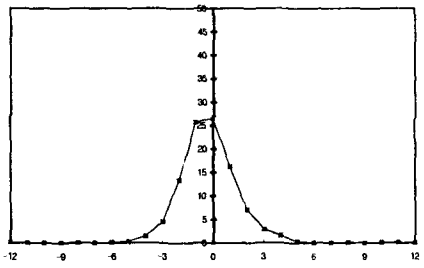
은 운동량비와 충돌점에 따라 결정되어 진다. 운동량비가 클수록 2차 충돌각은 작아지는데 이는 혼합효율의 저하를 가져온다.

충돌점은 1차충돌에서 산화제분류와 연료분류가 부딪히는 점을 말한다. 산화제분류의 직경이 연료분류직경 보다 크기 때문에 연료분류가 산화제 분류의 가운데 부분에서 부딪히지 못하면 2차충돌각에 영향을 미치고 이는 혼합효율을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

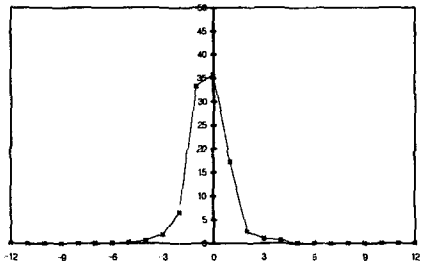
Fig 4는 운동량비 변화에 따른 질량분포의 변화를 Fig 5는 가로 0번 line에서의 normalize mass height를 나타낸다. 가로 세로 (0,0)은 patternator의 중심부를 나타내며 등고선의 간격은 질량분포의 조밀도를 나타낸다.



(a) MR = 0.83



(b) MR = 2.21



(c) MR = 4.79

Fig 5. Normalize mass height

FOOF 충돌형 인젝터는 2차충돌로 만들어지는 부채모양의 액막을 산화제분류가 타고 내리면서 혼합 및 미립화가 이루어진다. 산화제의 유량이 증가할수록 다시말해 운동량비가 증가할수록 2차충돌로 만들어지는 부채모양액막이 형성되지 않는다. 이는 산화제의 중앙집중화를 만들고 측면의 연료분류가 산화제분류를 침투하지 못하고 그냥 흘러 내리는 결과를 초래한다. 즉 분무범위가 중앙 집중화되는 것이다. 연료의 유량이 증가할수록 다시말해 운동량비가 감소할수록 분무범위가 커지고 2차충돌로 만들어지는 부채모양액막이 커지며 이를 타고 내리는 산화제분류는 양측면에서 큰 분포를 갖게 된다.

Patternator에 채집된 모의 추진제의 국부 혼합비분포와 국부 질량분포는 침투깊이와 관계되는데 침투깊이는 측면의 연료분류가 중심의 산화제분류를 파고드는 정도로서 이는 산화제 분류와 연료 분류의 운동량비와 관계된다. FOOF 충돌형 인젝터의 경우 운동량비가 작을수록 침투깊이가 깊어진다[6].

5.2 H_2O/Kerosene을 모의 추진제로 사용할 때의 혼합효율

Fig 6는 운동량비의 변화에 따른 혼합효율의 변화를 나타낸 것으로 ●점은 비연소 혼합실험으로부터 얻은 값들이고 —는 Curve fitting하여 예측한 값이다. 실험을 통하여 얻은 값을 보면 본 인젝터의 최적 혼합성능을 나타내는 운동량비 1.5을 기준으로 이 이상의 운동량비는 모의산화제의 운동량이 증가하여 침투깊이는 작아져 혼합효율의 저하를 가져온다. 반면 운동량비 1.5미만은 산화제분류의 유량감소를 의미함으로 모의 추진제의 질량분포가 넓은 범위에 걸쳐 분포되지만 운동량비가 감소함에 따라 침투깊이는 깊어져 중심과 바깥 가장자리의 혼합비는 좋지만 전체적인 혼합비는 떨어져 혼합효율의 저하를 가져온다.

위의 운동량비 변화에 따른 국부 혼합비 분포와 국부 질량분포의 분석으로부터 운동량비 1.5(총혼합비 1.89)에서 혼합효율을 구하는 식(2)을 적용하면 혼합효율은 82%의 최대 값을 보이고 있으며 운동량비가 1.5에서 멀어질수록 침투깊이가 작거나 크기 때문에 혼합효율의 저하를 보인다.

5.3 LOX/Kerosene을 추진제로 사용할 때의 혼합특성속도 및 혼합특성속도 효율의 예측

H_2O/kerosene로 인젝터의 혼합성능을 측정한 주목적은 Cold Flow Test에서 다루기 어려운 실제 추진제의 혼합특성속도와 혼합특성속도 효율을 예측하여 연소성능을 간편히 예견하기 위한 것이다. 실제 추진제는 LOX/Kerosene을 선정하였으며 혼합특성속도와 혼합특성속도 효율의 계산에서 연소실 압력은 P_c = 200psia로 하였다. H_2O/kerosene에서 LOX/Kerosene으로의 총 혼합비와 국부 혼합비 환산은 식(4)을 이용하였으며 혼합효율을 구하는 식(3)에서 LOX/Kerosene의 국부질량과 총질량의 비

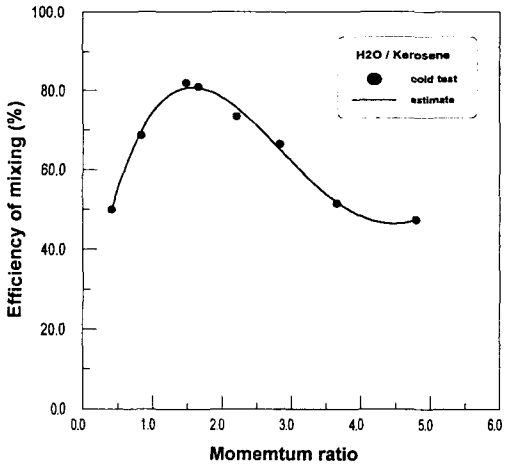


Fig 6. Efficiency of Mixing vs. Momentum Ratio

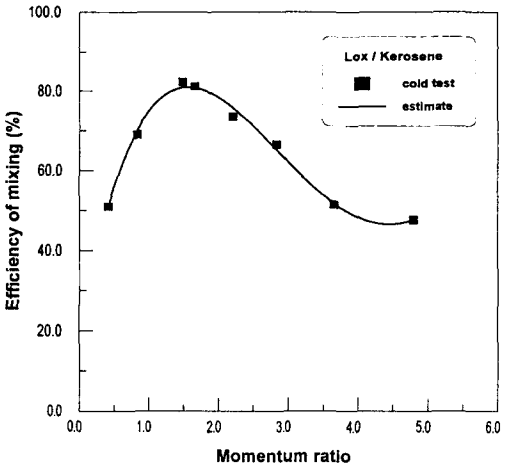


Fig 7. Efficiency of Mixing vs. Momentum Ratio

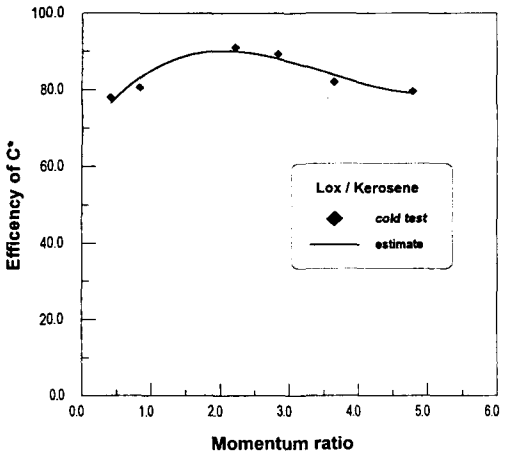


Fig 8. Mixing c* vs. Momentum Ratio

는 측정할 수 없기 때문에 LOX/Kerosene의 모의 추진제를 사용했을 때와 같다고 가정하였다.

Fig 7는 운동량비 변화에 따른 LOX/Kerosene의 혼합효율을 나타내는 것으로서 모의 추진제의 혼합효율과 거의 같은 경향을 보이며 운동량비 1.5 (총혼합비 1.89)에서 혼합효율은 최적을 나타낸다.

Fig 8은 추진제로 LOX/Kerosene을 사용하였을 때의 운동량비에 따른 혼합특성속도로서 운동량비 2.0 (총 혼합비 2.17)근방에서 90%의 최적 값이 존재함을 알 수 있다. 식 (6)으로부터 혼합특성속도는 국부적인 이론특성속도와 혼합비-빈도분포의 종합적인 관계로 나타남을 알 수 있지만 그 경향이 국부적인 특성속도와 더 근사하기 때문에 혼합특성속도는 혼합비-빈도분포의 영향보다 국부적인 특성속도의 영향을 더 받는 것으로 사료된다.

6. 결 론

Unlike Impinging split Triplet Injector에 대한 혼합실험으로부터 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 최종혼합효율에 영향을 미치는 2차 충돌각은 운동량비와 충돌점에 따라 결정되어지며 운동량비가 클수록 2차 충돌각은 작아지고 충돌점이 정확하지 못하면 2차 충돌각에 영향을 미쳐 혼합효율을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.
2. 운동량비가 증가함에 따라 질량분포영역은 좁아지고 중앙집중화가 증가된다.
3. 본 인젝터는 모의추진제 H_2O/kerosene과 실제 추진제 LOX/Kerosene의 운동량비 1.5(총 혼합비 1.89)에서 82%의 최대효율을 나타내며 운동량비가 1.5에서 멀어짐에 따라 침투깊이가 작거나 크기 때문에 혼합효율은 저하된다.
4. 혼합시험을 통하여 예측된 LOX/Kerosene의 혼합특성속도 효율은 운동량비 2.0부근에서 최대값을 나타낸다.

후 기

본 연구는 1999년도 항공우주연구소의 단일요소 분사기의 연소성능시험(II) 과제를 위한 연구비에 의해 연구 되였으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김유 외 3명, "액체 로켓 엔젠용 Unlike Triplet Impinging 인젝터(O-F-O형)의 분무 및 연소효율에 관한 연구", 항공우주공학회 춘계 학술발표회 논문집, 1997년 4월.
2. 김유 외 3인 "Unlike 충돌형 Triplet 인젝터(O-F-O형)의 혼합성능에 관한 연구", 항공우주공학회 추계 학술발표회 논문집, 1997년 11월.
3. Kazuo SATO, "A Study of N_2O_4/Amine Injector Elements Part 1 Cold Flow Test", 航空宇宙技術報告 TR-899, 1986년 2월.
4. A.Ferrenberg, V.Jaqua, "Arinuzatuib and Mixing Study Inerim Report", NASA-CR-170943, Rocketdyne, July 1983.
5. Hiroshi Tamura, etc, "Injection and Combustion Chracteristics of Unlike Impinging Triplet Injector for LOX-Kerosene Rocket Combustor", NAL TR 648, 1980
6. 김선진, "衝突型 Doublet 인젝터의 噴霧特性 및 燃燒性能에 관한 實驗的 硏究". 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1997년 8월.