

고압 유동조건에서의 액체 램제트 엔진의 분무특성

Spray Characteristics of a Liquid-fueled Ramjet Engine under High Pressure Air Condition

윤현진*, 이충원**
H. J. Youn*, C. W. Lee**

Abstract

In a liquid-fueled ramjet engine, the insufficient mixing and evaporation result in the low combustion efficiency and combustion instability. Improving its characteristics and devising a means of fuel droplets with air may compensate these disadvantages of liquid fuel ramjet engine. The jet penetrations of various fuel injectors were measured to investigate the spray characteristics of a liquid-fueled ramjet engine under high pressure air-stream conditions. The penetrations in high pressure conditions are smaller than the values calculated from Inamura's or Lee's equations, and the jet penetrations in the high pressure conditions have a similar tendency. In the dual orifice injectors, the jet penetrations of rear orifice is rapidly increased due to the reduction of the drag, which is created by the jet column of front orifice. The jet penetration of rear orifice is increased because of the drag reduction created by the jet column of the front orifice. Because of the drag reduction formed by the column of jet, the jet penetration in the rear orifice of dual orifice injector is much larger than the jet penetrations of single orifice injector. As the distances of the orifice are increased, the jet penetrations of the rear orifice decrease.

주요기술용어(Key Words): Spray Characteristics, Liquid-fueled Ramjet Engine,
Fluid Visualization, Jet Penetration

1. 서론

램제트엔진에 있어서 액체연료(Storable liquid fuel)는 높은 발열량(Heating value)과 밀도 때문에 그 이용가치가 증대하고 있다. 하지만, 이러한 장점에도 불구하고 액체램제의 경우 연료의 착화에 앞서 연료의 증발과 연료-공기의 혼합에 시간이 걸리고 그 결과 불충분한 연료액적의 증발 및 혼합은 필연적으로 램제트 연소기의 연소성능의 저하와 화염의 불안정성을 초래하게 된다.⁽¹⁾

특히, 고속기류 중에 수직으로 분사되는 액체 램제트 엔진에서의 분무과정은 다수의 복잡한 현상들이 상호 밀접하게 연결되어 있어 고난도의 복합적인 현상으로 나타난다. 이러한 미립화 과정과 혼합 메카니즘은 램제트 연소기에서의 연소 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 기체연료 분사의 경우에는 연소상태는 거의 공기와 연료의 혼합 상태에서 결정되어 지지만, 액체연료의 분사에서는 분사후의 액주의 분열 및 미립화 과정과 혼합과정을 거치므로 기체 연료 분사의 연구에 비해 많은 실험적 제약이 따른다. 또한 현재 액주의 분열 모델이 명확히 규명되지 않은 상태이며, 대부분의 전산유동해석용 스프레이 모델들이 액주의 분열현상을 배제하고, 단지 액적이 이미 분열하고 난 후의 궤적만을 묘사

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 경북대학교 기계공학부

하고 있기 때문에 실제현상을 정확하게 이론적으로 정립하기는 어려운 실정이다. 따라서 이러한 복잡한 액체 연료의 미립화 현상을 파악하기 위해서는 실제 실험을 통한 액체 연료의 미립화 모델의 정립이 필요하다.

일반적으로 램제트엔진에 사용되는 연료 분사방식으로는 분사기를 유동방향과 나란히 분사하는 방식(Perpendicular Jet Injection)과 유동방향과 반대로 분사하는 방식(Opposed Jet Fuel Injection), 유동방향과 직각으로 분사하는 방식(Parallel Fuel Injection), 그리고 충돌분사 방식(Impinging Jet Fuel Injection) 등을 들 수가 있다. 본 연구에서는 수직(Single orifice, Dual orifice) 분사 방식을 채택하여 Injector의 형상, 분사압, 외부유동조건에 변화에 따라 연료 Jet의 미립화 특성을 조사하고, 이를 수치해석을 위한 기본 자료로 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

램젯 지상 시험 설비의 경우 고압의 공기가 대기 중으로 방출되는 시스템이기 때문에 설비의 안정성이 중요하다. 본 연구에서는 시험 설비에 앞서 2set의 stand(ramjet, hybrid)로 구성된 연소 실험 설비를 구축하였다. 외부와의 차단을 위한 높이 3m의 실외 방호벽, control room과 test room 사이에 높이 3m의 실내 방호벽이 구성되어 있으며, 실험에 사용되는 gas(N₂, O₂, H₂)는 외부의 가스보관 시설에서 공급된다. 또한 test section으로 공급되는 압축 공기는 실험실의 2층에 설치되어있는 air compressor에서 공급된다.

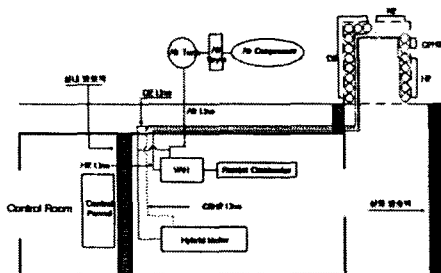


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

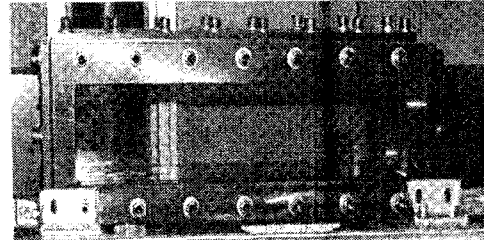


Fig. 2 Visualization apparatus

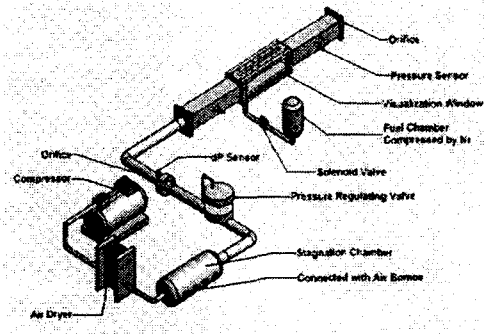


Fig. 3 Experimental apparatus

Table 1 Specifications

Compressor	1. P _{max} = 50 atm
	2. Charging time (1.6 m ³) = 80 min
	3. 220V, 50A
	4. 1600*750*1000, 370kg, 2head 2motor
Dryer	1. Performance : 2 m ³ /hour
	2. 1000*400*900. 80kg
air reservoir	1. Volume : 80L * 20 = 1.6 m ³ 2. D _i = 300mm, L = 900mm
Pressure control valve	1. Control range : 0~50 atm
	2. Feed-back control type
Visualization apparatus	1. Window : 240*100 (side), 240*40(upper)
	2. Orifice : D _o =10 mm, 27mm
dP sensor	Range of sensing : 0~50 atm

가스 및 공기의 공급 배관도는 Fig. 1과 같다. 각 배관에는 regulate control valve, shut-off valve, 압력센서 등이 장착되어있다.

본 실험에서의 고압 공기 고압 compressor를 통해 공급된다. Compressor의 최대 압축압력 (P_{max})은 50 atm이며, 압축된 고압의 공기는 건조기(dryer)를 거쳐 수분이 제거된 상태에서 압력용기에 저장된다. 압력용기의 체적은 1.6 m³이며 원통형의 stagnation chamber에 20개의 압력용기 (20L)가 연결되어 있다. 고압 압력 용기에 저장된 공기는 Shot-off valve와 Pressure regulating valve를 통해 설정 압력으로 조절된 후 가시화 장치로 유입된다. 이 때 공기 압력은 차압센서를 이용해 valve의 diaphragm 유격을 조절하는 feed-back system을 사용하였다. 압력 조절 밸브를 거쳐 압력이 설정압력으로 조절된 공기는 Fig. 2의 가시화 장치 (Visualization apparatus)로 유입된다. 가시화 장치는 단면적 100mm*100mm의 사각형 duct로 측면과 상부의 3개의 window로 구성되어 있다. 가시화 장치의 상부와 하부에는 압력 측정을 위한 압력센서를 장착하였으며 장치내의 압력 조절을 위해 하부에 오리피스를 장착하였다. ($D_{ori} = 10 \text{ mm}, 27\text{mm}$)

Fig. 3은 본 실험의 전체 개요도를 보여준다. 연료는 가시화 장치의 하단에서 injector를 통해 분사되며, 연료 chamber의 압력은 질소와 regulator를 이용하여 조절하였다. 이상의 실험 장치의 세부사항을 정리하면 Table 1과 같다.

2.2 Fuel Injector

본 실험에서 연료분사용 injector는 single orifice injector와 dual orifice injector(Fig. 4)를 사용하였다.

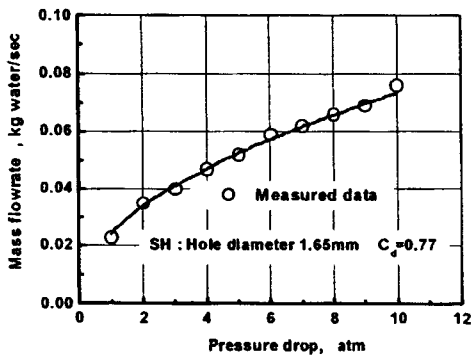


Fig. 5 Discharge coefficient

Single orifice injector은 orifice가 중앙에 1개 있는 경우로 각각의 orifice 내경은 1.65, 1.83, 2.10mm로 구성되어 있으며, dual orifice injector는 injector orifice가 주류공기와 수평방향으로 2개가 있는 경우로 orifice의 내경은 1.65mm로 동일하며, 2개의 orifice사이의 거리(L_h)를 각각 5, 10, 15mm로 하였다.

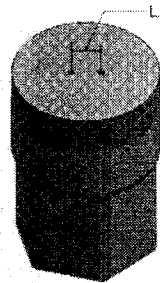


Fig. 4 Dual orifice injector

Table. 2 Discharge coefficient

Nozzle Type		C_d
SH (Single orifice)	$D_i=1.65\text{mm}$	0.77
	$D_i=1.65\text{mm}$	0.78
	$D_i=1.65\text{mm}$	0.77
DH (Dual orifice) $D_i=1.65\text{mm}$	$L_h=1.65\text{mm}$	0.79
	$L_h=1.65\text{mm}$	0.78
	$L_h=1.65\text{mm}$	0.79

이상 6가지의 injector의 배출계수(Discharge coefficient : C_d)를 Fig. 5와 같이 측정하였다. 배출계수는 이론적 질량유량과 실제 질량유량의 비로 측정되며 수식(1)을 따른다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (1-1)$$

각각의 injector에서의 배출계수를 Table 1에 나타내었다.

2.3 Velocity distributions

연소기로 유입되는 주류공기의 속도분포는 램젯 연소기 내에서의 연료의 분무특성과 증발, 착화 등의 연소특성에 중요한 영향을 미친다.

Fig. 6은 가시화 장치 중앙지점에서의 축방향 압력분포와 속도분포를 보여준다. 가시화 장치의 양 끝 지점에서 약간의 감소를 보이지만 전체적으로 균일한 속도분포를 보여준다. 이상의 결과로 본 분무실험에서 주류 공기 속도의 불균일성으로 인한 이상 분무현상은 없으리라 생각된다.

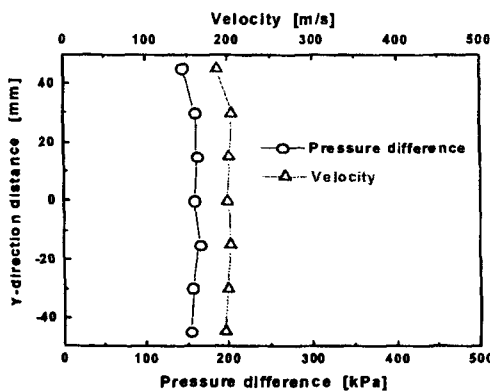


Fig. 6 Velocity & ΔP distributions (P_s=6.76 atm)

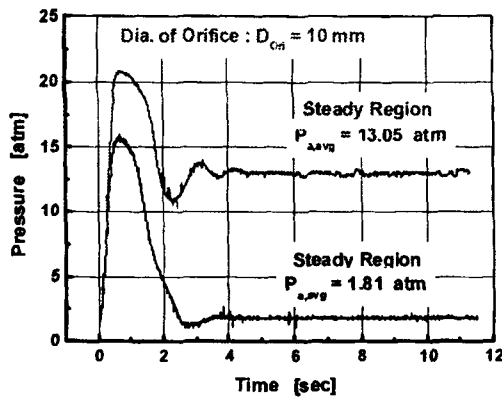


Fig. 7 Time-pressure curve

Fig. 7은 가시화 장치내의 압력 변화 곡선이다. 압력은 초기에 압력 조절 밸브가 열리면서 급격히 상승하는데 그 최대치는 약 15atm에서 25atm까지 상승하게 된다. 초기에 상승한 압력은 몇 번의 damping 과정을 거치면서 steady 상태에 도달하게 된다. 작동시작에서 steady 압력 상태까지 소요되는 시간은 약 5초가량 소요되며, 본 실험의 분무 실험은 압력조절밸브 개

폐 후 5초 이후에 진행되었다.

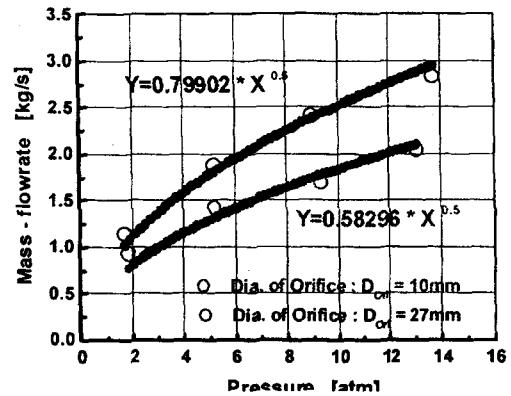


Fig. 8 Mass flow-rate

Fig. 8은 본 실험의 유량특성을 보여준다. 용이한 압력조절을 위하여 가시화장치 후단에 2 종류의 면적이 다른 오리피스를 사용하였다. 각각의 오리피스 직경에서 4개의 압력조건에서의 질량유량이 측정되었으며 측정된 질량유량은 curve fitting을 통하여 제시된 식과 같은 보정식이 유도되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료 Jet의 미립화 기구

램제트 엔진에서 연소특성에 영향을 미치는 연료와 공기의 혼합특성은 크게 혼합공기의 유동특성과 연료분사조건에 의해 좌우되는 분무특성에 의해 영향을 받는다. 특히 Dump 형 램젯 연소기의 경우에는 공기 흡입구의 끝 부분에 위치한 재순환 영역에서 연료의 체류시간과 연소기 전체에 걸친 연료의 농도분포가 화연의 안정에 영향을 미치는 요소이다. Fig. 9에 나타난 이러한 액주의 분열과정은 액주가 대기 중으로 분사가 될 경우에 정지한 주위의 공기에 대한 Jet의 상대속도에 의하여 액주의 표면파가 생성이 되고 좀 더 하류방향으로 진행함으로써 액주가 분열하여 더 큰 액주가 분열하여 큰 액적을 형성한 후 노즐로부터 더욱 먼 거리에서 상대속도에 의하여 더 작은 액적의 분포를 형성하게 된다. 이러한 액주의 분열은 일반적인

실험적인 상황에서 연구되어지고 있으나, 실제 Ramjet엔진, Gas Turbine엔진의 경우에는 주위의 기류속도가 존재함으로 분열현상도 상당히 복잡하게 형성된다.

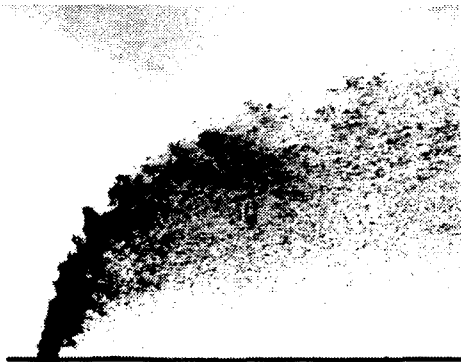


Fig. 9 Fuel Jet
($V_{air}=120\text{m/s}$, $P_{jet}=3\text{atm}$)

주위의 유동장에 의하여 액주의 상대적인 속도에 따라서 Penetration(hp)의 길이가 달라진다. Ramjet 연소기에서 Penetration의 길이는 화염의 안정성과 분포에 영향을 미치는 중요한 요소이므로 이에 대하여 연구한다. 액주의 분열 지점에서 액적이 떨어져 나가면서 주류의 속도에 의하여 horse-shoes처럼 모양이 바뀌고 Downstream으로 진행할수록 점점 더 작은 액적으로 분열이 된다. 기류의 평균 유속이 작은 경우에는 더욱 큰 horse-shoes의 형태를 유지하게 된다. 그리고 노즐로부터 분사되어 일정한 Penetration Length(hp)를 가지게 되는 부분에서는 액주가 solid body 역할을 하게 되므로 주위에서는 항력과 Separation이 생기게 되고, 액주의 분사면을 따라서 wake가 상승하게 된다. 그리고, 액주 내부에서는 Counter-rotating Vortex-Pairs가 생성된다. 생성된 Counter-rotating Vortex-Pairs는 Downstream 방향으로 유동전반에 영향을 미치게 된다.

3.2 실험결과 및 고찰

Single orifice injector은 압력형 분무장치의 가장 일반적인 형태로 액체를 가압하여 작은 오리피스 구멍을 통과시키는 장치로써 분사 액체 자체의 유동 상태 및 주위 기체와 분사 액체

사이의 상호작용에 의해서 미립화가 진행되며, 그 구조가 간단하고 미립화 성능이 우수하여 각종 로켓 엔진 연료 분사장치나 디젤 연료 분사 장치 등에 이용된다.

Single orifice injector의 경우 연료의 penetration에 관한 많은 연구가 보고 되었고, 그 중에서도 고온 유동장에서의 연료의 침투깊이를 대표하는 Inamura 등의⁽²⁾ 경험식과 이를 보정한 Lee 등의⁽³⁾ 보정식(수식 1-2) 등이 대표적인 연구이다. 하지만 이러한 식들은 주류공기의 압력의 영향을 고려하지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 대기압 유동조건에서의 연료 분사가 아닌 고압 유동조건에서의 연료의 침투깊이를 측정하였다. 그림 1-16은 penetration의 정의이다. 즉 분무의 침투깊이는 정지된 기체내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 거리를 의미한다. 대체로 분무각이 작고 액적의 크기가 큰 경우 침투깊이는 크고, 미세한 액적으로 분출되는 경우 침투깊이가 작게 된다.

$$\frac{Y}{D_0} = (1.2 + 0.4 D_0) q^{0.36x}$$

$$\ln[1 + (1.56 + 0.48 D_0) \frac{X}{D_0}] \quad (2)$$

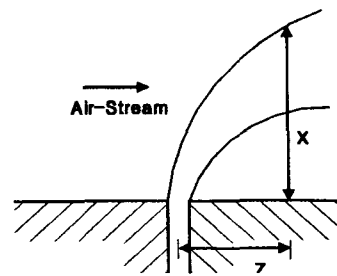


Fig. 10 Jet penetration

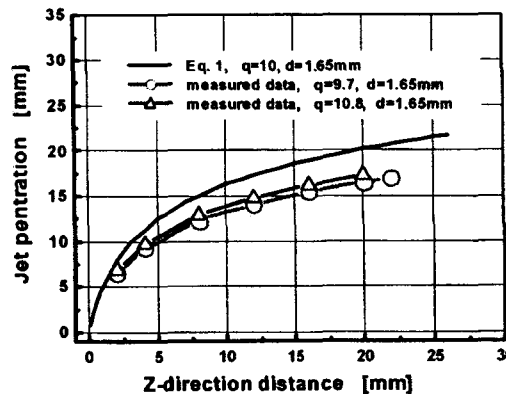


Fig. 11 Jet penetration ($P_s=2.84\text{atm}$)

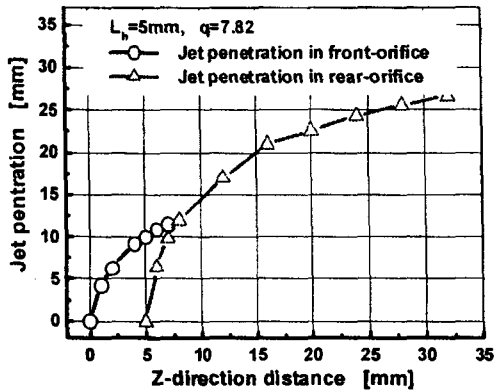


Fig. 12 Jet penetration (dual-orifice injector) ($P_a=2.39\text{atm}$, $L_n=5\text{mm}$, $q=7.82$)

Fig. 11은 대기압 상태에서의 연료 액적의 침투깊이와 고압 상태에서의 연료 액적의 침투깊이를 비교 한 것이다. 대기압 상태에서의 연료 액적의 침투깊이는 수식(2)에 의해 계산된 값이다. 유동공기압이 2.3 atm 일 때의 침투깊이는 대기압 조건에서의 침투깊이와 비교 할 때 훨씬 작은 값을 갖는다. 그리고, 같은 고압 상태에서 분무의 경우, 운동량비(q)와 상관없이 거의 같은 크기의 침투 깊이를 가지는데, 이러한 결과는 수식(1-2)의 운동량비의 지수(0.36)가 더 낮은 값으로 수정되어야 함을 의미한다. 현재까지의 실험결과는 지수가 약 0.28에서 0.31 정도의 값에서 실험치와 거의 일치하는 경향을 나타내고 있는데, 정확한 보정식을 얻기 위해서는 좀더 광범위한 실험 조건에서의 정확한 실험이 필요하다.

Dual orifice injector는 연료분사 orifice가 주류공기의 유동방향과 수평으로 2개가 있는 경우이다. Dual orifice injector는 전단에 있는 orifice에서 분사되는 액주가 공기유동의 저항체로 작용하여 후단의 액주는 침투깊이가 증가하게 된다. 즉, 액적의 침투깊이는 분출되는 액적의 운동에너지와 주류공기에 의한 공기역학적 상대적인 크기에 의해 결정되는데, 후단의 액주의 경우 상대적으로 주류공기에 의한 저항을 적게 받게 된다.

주류 공기의 압력이 2.84atm이고 운동량비가 7.82, 인젝터의 orifice 사이의 거리가 5mm 일 때, 연료의 침투깊이를 Fig. 12에 나타내었다. 인젝터의 front-orifice에서 분사되는 액주의 영

향으로 rear-orifice jet의 저항이 감소하여 연료의 침투깊이가 증가함을 알 수 있다. 이러한 침투깊이의 증가량을 Fig. 13에 나타내었다.

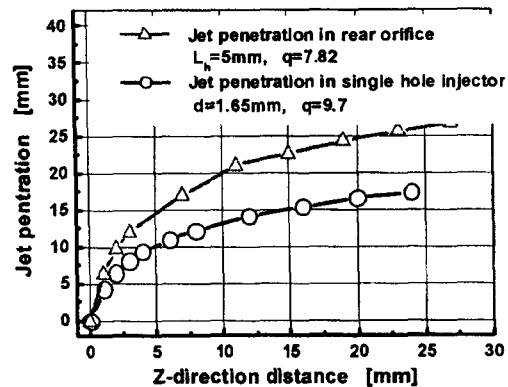


Fig. 13 Comparison of jet penetration

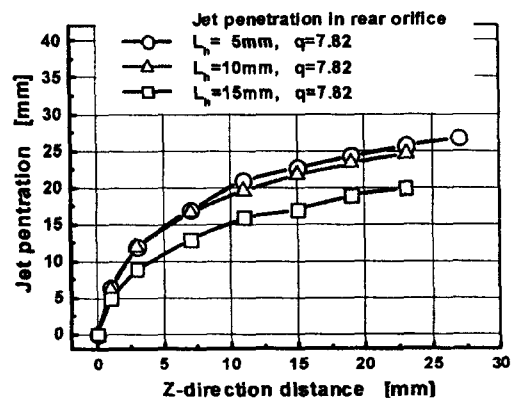


Fig. 14 Jet penetration in variation of distance of orifice

Fig. 13은 single orifice injector와 dual orifice injector의 rear-orifice에서의 연료의 침투깊이를 비교한 것이다. single-orifice injector의 경우 주류공기의 저항을 그대로 받기 때문에 jet penetration이 작는데 반해, dual-orifice injector의 rear-orifice의 경우 전단의 orifice에 의한 주류공기의 저항 감소효과로 인하여 penetration이 증가한다. 이러한 penetration의 증가효과는 Z방향 거리 20mm를 기준으로 했을 때($L_n=5\text{mm}$), 약 40% 가량이 증가하는 효과가 있다. 하지만 이러한 효과는 두 orifice 사이의 거리가 커질수록 그 효과가 작아지는데 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에서 두

orifice 사이의 거리(L_h)를 변화시키면서 rear-orifice에서의 jet penetration을 측정하였다. 두 orifice 사이의 거리가 5mm와 10mm 일 때는 그 증가효과가 거의 같지만, 15mm 일 때는 그 효과가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 이는 두 orifice 사이의 거리가 작을 때는 전단의 orifice에 의한 공기저항 감소의 효과가 크지만 거리가 멀어질수록 rear-orifice 주변에서의 주류공기가 압력을 회복하여 일반 single-orifice injector에서의 연료분사와 거의 흡사한 연료의 침투깊이 경향을 가지기 때문이다.

4. 결론

액체 램제트 엔진의 분무특성을 파악하기 위한 본 연구에서, 인젝트의 형상과 주류공기의 압력, 연료의 분사압 등의 변화에 따른 연료의 침투깊이 등을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고압 공기유동 조건에서 측정된 연료의 침투깊이는 Inamura 등에 의해 만들어진 실험식과 비교하여, 약간 작은 값을 나타내며, 같은 공기압력 조건에서는 거의 비슷한 침투깊이값을 가진다.

(2) Dual orifice injector의 경우, front orifice의 액주 후면에서 발생하는 공기저항의 감소 때문에 rear orifice에서의 연료의 침투깊이는 급격히 증가한다.

이러한 결과로 인해 Dual orifice injector의 침투깊이는 single orifice injector와 비교 할 때 훨씬 큰 값을 가진다.

(3) Dual orifice injector에서, orifice 사이의 거리가 커질수록 rear orifice에서의 연료의 침투깊이는 감소하며, 이러한 결과는 rear orifice에서의 주류공기의 압력회복에 기인한다.

참고 문헌

1. Waltup, P.J. "Liquid-fueled supersonic combustion ramjets" A research perspective, Journal of Propulsion and Power, Vol.3, No.6, pp.515-524,1987
2. Inamura, T., Nagai, N., Yoshimura, K., Kumakawa, A. and Yatsuyanagi, N. "Spray formation and spray combustion in ramjet combustor", Proc. The ASME/JSME Thermal Engineering, Honolulu, pp.157-162,1995.
3. C. W. Lee, S. Y. Moon, C. H. Sohn and H. J. Youn "Spray and combustion characteristics of dump-type ramjet combustor", KSME International Journal Vol.17, No.12, pp.2019~2026,2003