

수직 분사되는 연료제트의 분무 및 연소특성

Characteristics of the Spray and Combustion in the Liquid Jet

윤 현 진* 문 수 연** 손 창 현** 이 충 원**
 Youn, Hyun-Jin Moon, Soo-Yeon Sohn, Chang-Hyun Lee, Choong-Won

ABSTRACT

In this paper, spray and combustion characteristics of a liquid-fueled ramjet engine were experimentally investigated. The spray penetrations were measured to clarify the spray characteristics of a liquid jet injected transversely into the subsonic vitiated airstream, which is maintained a high velocity and temperature. The spray penetrations are increased with decreasing airstream velocity, increasing airstream temperature, and increasing air-fuel momentum ratio. To compensate our results of penetrations, the new experimental equation were modified from Inamura's equation. In the case of insufficient penetration, the combustion phenomenon in ram-combustor were unstable. Therefore, the sufficient penetration must be considered to make a stable flame.

주요기술용어 : Spray Mechanism(분무기구), Liquid-fueled Ramjet Engine(액체 램젯 엔진), Vitiated Air Heater(공기가열기), Fluid Visualization(유동 가시화), Jet Penetration(침투깊이), Flame Stability(화염안정화)

1. 서 론

최근 액체 연료의 분사시스템에 있어서 연소실내의 주류의 공기 유동이 미치는 영향을 최소화하면서 좋은 분무특성을 얻기 위한 분사 방법의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중에서도 구조가 간단하고 미립화 성능이 우수한 수직 방향의 연료 분사방식이 많이 연구되고 있다. 특히, 램젯 엔진이나 터보젯 엔진

등에서는 노즐에서 액체 연료를 기류에 대해 수직으로 분사하는 방법을 많이 채택하고 있으며, 이러한 수직 분사 방법은 터빈 및 터빈익의 분무냉각 등의 산업 분야 등의 실제적인 응용 예가 많이 있다.

고속기류 중 수직으로 분사되는 액체 램젯 엔진에서의 분무과정은 다수의 복잡한 현상들이 상호 밀접하게 연결되어 있어 고난도의 복합적인 현상으로 나타난다.^[1] 즉, 난류유동, 유동 입구각, 분무기구, 기하학적 특성, 분사유체역학, 혼합 및 화학반응 메커니즘 등이 밀접하게 관계되어 있으며,^[2] 특히 분무 메커니즘의 관점에서, 분사되는 액체 연료는 유입되는 공

* 경북대학교 기계공학부 대학원

** 경북대학교 기계공학부 교수

기에 의하여 미립화 과정을 거치게 되고 그 후에 공기와 혼합되어 연소실내로 유입되게 된다. 이러한 미립화 과정과 혼합 메카니즘은 램제트 연소기에서의 연소성에 큰 영향을 미치게 된다. 기체연료의 분사의 경우에는 연소상태는 거의 기류와 공기와의 혼합 상태에서 결정되어지지만, 액체 연료의 분사에서는 분사 후에 액주의 분열 및 미립화 과정과 혼합과정을 거치므로 기체 연료분사의 연구에 비해 많은 실험적 제약이 따르고, 따라서 그 연구가 미흡한 실정이다. 또한 현재 액주의 분열 모델이 명확히 규명되지 않은 상태이며,^[3] 대부분의 전산유동해석용 스프레이 모델들이 액주의 분열현상을 배제하고, 단지 액적이 이미 분열하고 난 후의 궤적만을 모사하고 있기 때문에 실제 현상을 정확하게 이론적으로 정립하기는 어려운 실정이다. 따라서 이러한 복잡한 액체 연료의 미립화 현상을 파악하기 위해서는 실제 실험을 통한 액체 연료의 미립화 모델의 정립이 필요하다.

수직분사 연료제트의 분무 및 연소특성에 관한 기존의 연구는, 산란광을 이용한 분무사진이나 shadow graph를 이용하여 분류가 침투하는 깊이의 측정이 Schetz^[4] 등에 의해 이루어 졌으며, Thomas^[5] 등은 액체의 국소 질량유량의 측정 등에 의한 분무내부의 구조에 대하여 연구했으며, Inamura^[6]는 아음속영역에서 수직 분사되는 액주의 침투깊이에 대해 실험과 수치해석적인 방법을 통하여 설명하고 있다. 이외에도 Adeleeng^[7]는 액체 제트의 최초분열을 Weber^[8]의 이론을 바탕으로 해석하고 평균입경을 실험을 통하여 측정하였고, Manela^[9]와 Hautman^[10]은 천이음속에서 침투깊이를 기류와 액체의 운동량비로부터 계산하였다.

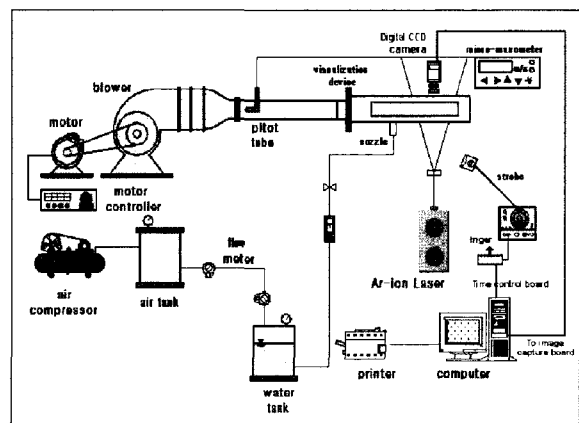
하지만 기존의 연구들은 상온에서, 주류의 속도가 비교적 낮은 특정분사조건에서의 분무특성을 파악하

는데 그치고 있기 때문에, 액체 램제트와 같은 고속의 기류에서 유입공기의 온도 변화에 따른 미립화 특성과 연소특성에 관한 연구는 아직도 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기류의 속도를 기존의 연구에서보다 훨씬 고속의 영역인 63m/s에서 120m/s까지 변화시키고 액체 분류의 유량을 0.2 l/min (2.97g/s)에서 0.5 l/min (7.42g/s)까지 변화시켜, 주류와 연료의 운동량비에 따른 침투깊이를 측정하고, 이때의 연소실 온도분포를 살펴봄으로써 기류에 수직 분사되는 액체 연료의 분무 및 연소 특성을 알아보려고 한다.

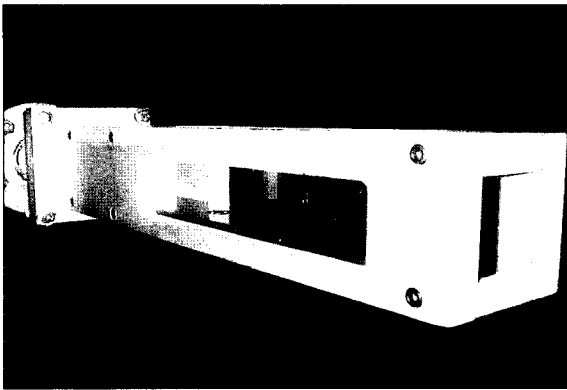
2. 실험장치 및 방법

실험장치는 공기공급부, 연료공급부, dump형 램제트 연소기, 가시화장치부, 측정부, 그리고 데이터 처리부로 구성되어 있다. 그림 1은 본 연구의 개략적인 실험장치를 보여준다.

공기는 송풍기를 이용하여 공급되며 속도를 변화시켜 공급할 수 있도록 하였다. 측정된 송풍기의 공



[그림 1] Schematic diagram of experimental apparatus

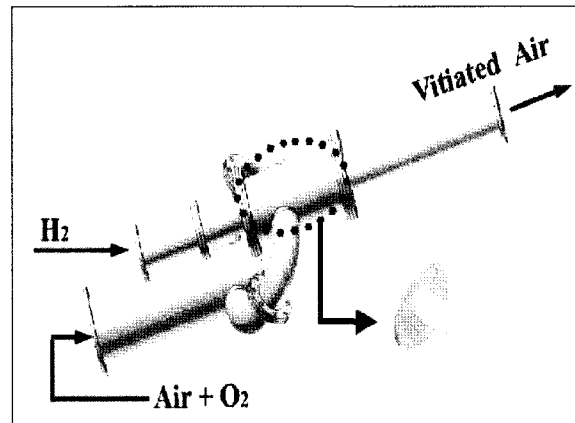


[그림 2] Photograph of visualization apparatus

기 속도 범위는 연소기 입구에서 최대 120m/s 최소 63m/s이며, 실험 조건은 주류공기와 연료의 운동량 비에 따른 침투깊이의 변화를 관찰하기 위해 63%, 80%, 100%의 세 가지 경우로 나누어 실험을 수행하였다.

연료는 압축 공기에 의해 분사된다. 이때 분사유량은 유량조절 밸브를 이용하여 0.2 l/min (2.97g/s) 에서 0.5 l/min(7.42g/s) 까지 변화시켜 분사 되도록 하였다. 연료 분사 노즐은 압력형 단공노즐을 사용하였다. 단공노즐은 압력형 분무장치의 가장 일반적인 형태로 액체를 가압하여 작은 오리피스 구멍을 통과시키는 장치로서 기본적으로는 압력 에너지를 운동 에너지로 변환시키며 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. 사용된 연료 분사 노즐의 직경은 1mm이고 연소기 입구 100mm 전방, 벽면 하단 부에서 분사된다.

본 연구에서는 연소실험 시에 사용되어지는 Dump 형 연소기의 직경과 같은 당량 직경을 가지는 가시화 장치를 사용하여 연료의 침투깊이를 측정하였다. 그림

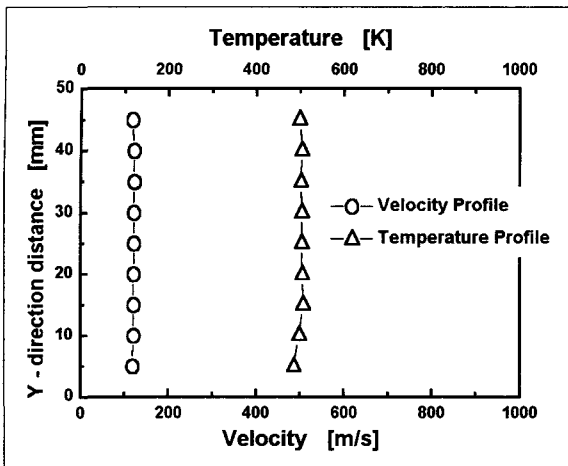


[그림 3] Photograph of a Vitiated Air Heater

2는 가시화 장치를 보여주는 사진이다. 가시화 장치는 외형은 알루미늄으로 제작하였으며 내부는 50×50×500 mm의 정방형 형태를 가지며, 강화유리를 사용하여 수직으로 분사되는 제트의 침투깊이와 분산도를 측정하기 위해 양쪽벽면과 상부의 벽을 석영으로 가공하였다.

액체 연료의 침투깊이를 측정하기 위하여 가시화 장치의 후면의 스트로보와, 전면의 CCD 카메라를 동기시켜 분사되는 연료의 순간영상을 촬영하였다. 그리고 Ar-ion 레이저와 cylindrical 렌즈를 이용하여 평행광을 만들고 이를 이용하여 분사 연료의 주류 유동 방향 단면을 CCD 카메라로 촬영하였다.

본 실험에서 연소기 입구의 유입공기의 온도를 변화시키기 위한 장치로 Vitiated Air Heater(VAH)를 사용하였다. 그림 3은 VAH의 개략도를 나타낸다. VAH는 고속의 공기를 수소와 산소를 혼합하여 연소 시킴으로서 산소의 체적비율이 공기와 같도록 만든 일정온도의 Vitiated Air를 발생하기 위한 장치로, VAH 내부에서 연소과정을 거쳐 램젯 연소기로 유입되는 공기의 산소성분이 일반 대기중의 산소성분 (20.9%)과 같아지도록 하기 위해 VAH로 유입되는



[그림 4] Velocity and Temperature distributions at the inlet of a Ram-combustor
($\dot{m}_{Air} = 0.238 \text{ kg/s}$)

공기에 여분의 산소(Make-up Oxygen)를 첨가하였으며, 그 양은 VAH의 연소반응에 의한 연소생성물 중의 산소 몰분율과 대기중의 산소 몰분율(0.2095)을 유입구에서의 공기의 산소농도를 측정하여 산소농도 같다고 놓음으로써 계산된다. 본 실험에서는 연소기가 항상 21%를 유지하도록 여분의 산소(make-up Oxygen)의 양을 조절하였다.

VAH 내에서 수소와 산소의 이론연소반응을 거쳐 Dump형 램제트 연소기의 입구로 유입되는 공기의 속도분포, 온도분포는 램제트 연소기내의 연료의 분무특성과 증발, 착화 등의 연소특성에 중요한 영향을 미친다.

그림 4는 특정 조건($\dot{m}_{Air} = 0.238 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_{H_2} = 1 \text{ g/s}$)에서 램제트 연소기 입구에서의 공기의 속도분포와 온도분포를 보여주고 있는데, 공기흡입구 전 영역에 걸쳐 균일한 속도분포를 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 연소기 유입공기의 온도나 속도의 불균일성에 기인한 이상분무나 연소현상은 없다고 가정

[표 1] Experimental Condition

VAH	Temp. of inlet air(T_0) = 298K, 500K Air velocity(V_0) = 63m/s, 80m/s, 100m/s
Fuel Injector	Flow-rate of fuel (Q_0) = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 l/min Dia. of injector tip(D_j) = 1mm
Test Section for Visualization	50mm × 50mm × 500mm (W × H × L) Visualization window × 3
Ram-Combustor	Dia. of Combustor inlet (D_i) = 50mm Dia. of Combustor outlet (D_o) = 100mm Length of Combustor (L_c) = 300mm

할 수 있다.

본 실험에서는 한 개의 공기흡입구가 중앙에 위치한 Dump형 연소기를 사용하였다. Dump형 연소기는 압력손실이 크다는 단점이 있지만 그 형태가 간단하고 유입공기의 유동조건에 민감하게 반응하지 않는다는 장점 때문에 많이 사용되고 있다. 연소기의 내경은 100mm, 길이는 300mm와 450mm 두 가지를 사용하였으며 공기 흡입구의 내경은 50mm이다

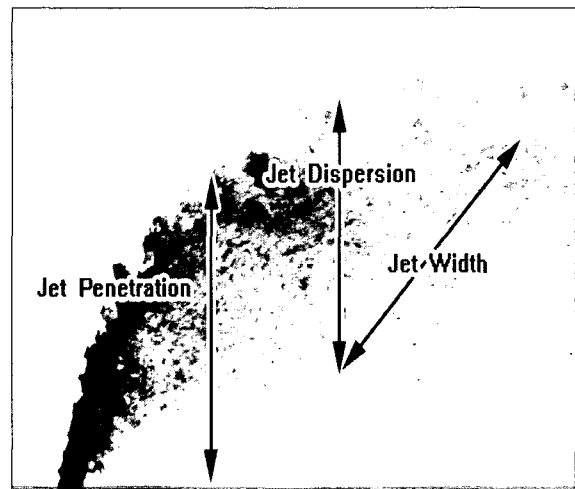
이상의 실험 조건을 정리하면 표 1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무기구

램제트 엔진에서의 연소특성에 영향을 미치는 연료와 공기의 혼합특성은 크게 흡입공기의 유동특성과 연료분사조건에 의해 좌우되는 분무특성에 의해 영향을 받는다. 특히, 액주의 분열과정은 액주가 대기 중으로 분사가 될 경우에 정지한 주위의 공기에 대한 제트의 상대속도에 의하여 액주의 표면파가 생성이 되고 좀 더 하류방향으로 진행함으로써 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 램제트 엔진, 가스터빈 엔진의 경우에는 주위의 기류속도가 존재함으로써 분열현상도 상당히 복잡하게 형성된다.^[11]

그림 5는 주위의 기류 속도가 100m/s이고 유입공기 온도 500K, 그리고 주류와 연료의 운동량비(q)가 9.44인 경우, 액체제트의 분열형태를 순간사진으로 촬영한 것으로 액주 주위의 유동장과 액주의 상대적 속도에 따라서 침투깊이(hp)가 달라지게 된다. 램제트 연소기에서 침투깊이의 길이는 화염의 안정성과 분포에 영향을 미치는 중요한 요소이므로 이에 대하여 고찰하였다. 액주에서 분열된 액적은 떨어져 나가면서 주류의 속도에 의하여 말굽모양처럼 모양이 바뀌고 기류의 하류방향으로 진행할수록 점점 더 작은 액적으로 분열이 된다. 기류의 평균 유속이 작은 경우에는 더욱 큰 말굽모양의 형태를 유지하게 된다. 그리고 노즐로부터 분사되어 일정한 침투깊이를 가지게 되는 부분에서는 액주가 Solid body 역할을 하게 되므로 주위에서는 항력과 박리가 생기게 되고, 액주의 분사면을 따라서 wake가 상승 하게 된다. 그리고, 액주 내

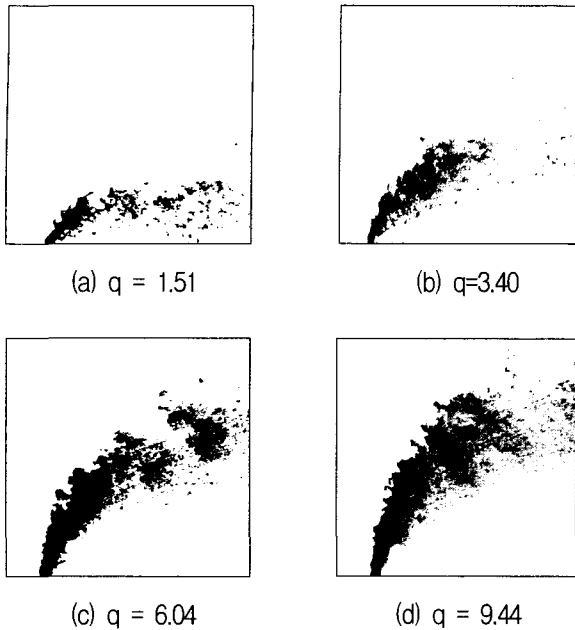


[그림 5] The schematic instantaneous photography of a liquid jet

부에서는 Counter-rotating vortex-pairs가 생성되고, 이것은 기류하류 방향으로 유동전반에 영향을 미치게 된다.

3.2 침투깊이 (Jet Penetration)

분무의 침투깊이(Jet Penetration Depth)는 정지된 기체 내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 최대 거리를 의미한다. 이 침투깊이는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해서 결정된다. 즉, 기체와 액체 사이의 마찰항력에 의해서 운동에너지의 소산이 일어난다. 결국 액체의 운동에너지를 주위에 모두 전달하고 나면 액적들은 주위 기체의 유동을 따라 흘러간다. 램제트엔진의 경우 침투깊이가 너무 크면 압력 손실이 증가하여 연소효율이 낮아지며, 침투깊이가 너무 작으면 기체와의 혼합이 잘 이루어지지 않아 고부하의 연소가 이루어지지 않고 화염이 불안정해 진다. 따라서 적절한 침투깊이는 램제트 연소기의 연소성능을 결정하는 중요한 인자라 할 수 있다.



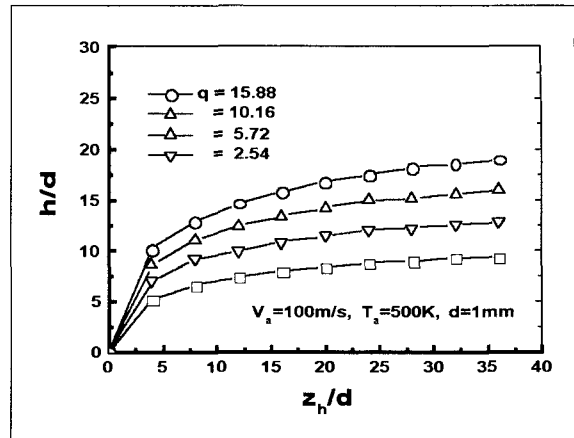
[그림 6] Jet penetration injections with a variance in fuel-to-air momentum ratios. ($T_i=298K, V_a=100m/s$)

그림 6은 유입공기의 온도가 298K, 속도가 100m/s일 때 분사유량 변화(운동량비)에 따른 침투깊이의 증가를 나타내고 있다. 이 때, 운동량비(q , Dynamic pressure ratio)는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$q = \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_a U_a^2} \quad (1)$$

그림 6에서 분사유량이 증가함에 따라 분사속도의 증가로 인해 연료의 침투깊이가 높아짐을 알 수 있다. 즉 연료의 운동량 유속비가 증가할 수록 침투깊이가 증가한다. 그리고 분사된 연료의 큰 직경의 액적들은 작은 직경의 액적들 보다 운동량이 크기 때문에 높은 위치에 도달한다.

그림 7은 유입공기의 속도와 온도 그리고 노즐직경



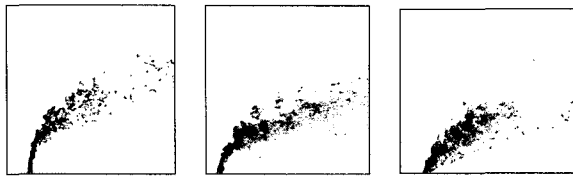
[그림 7] Effects of fuel-to-air momentum ratios on jet penetrations. ($V_a=100m/s, T_a=298K$)

이 같을 때, 운동량비에 따른 연료의 침투깊이의 변화를 나타내고 있다. 운동량비가 증가 할 수록 연료의 침투깊이는 증가하며 이러한 현상은 노즐 출구 영역에서 더욱 급격히 증가함을 알 수 있다. 하류로 내려갈수록 침투깊이의 증가폭이 작아지는데 이러한 현상은 공기저항의 증가에 기인한다.

그림 8은 유입공기의 온도가 298K, 연료 분사량이 0.3 l/min(4.45g/s)로 일정 할 때, 유입공기의 속도 증가에 따른 침투깊이의 변화를 나타낸다. 그림 6에서 유입공기의 속도가 증가함에 따라 같은 연료 분사조건(0.3 l/min)에서 침투깊이가 감소하는데, 이러한 현상은 유입공기의 운동량 증가에 기인한다. 즉, 유입공기가 가지는 운동량이 클수록 분사유체에 저항으로 작용하면서 미립화가 일찍 발생하게 된다.

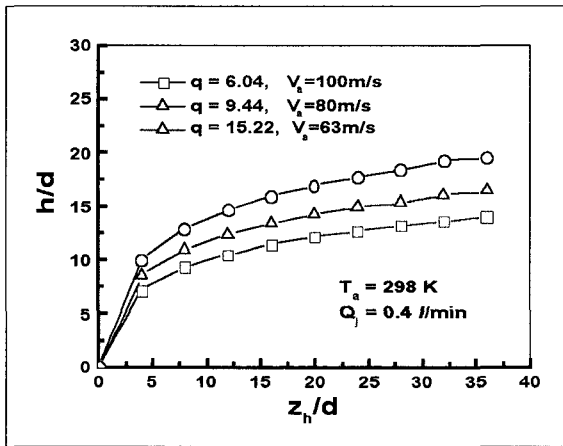
그림 9는 공기 속도의 변화에 따른 침투깊이의 변화를 나타낸다. 공기의 속도가 증가 할 수록 연료-공기의 운동량비는 작아지고 이는 연료 액적에 저항으로 작용하여 연료의 침투깊이가 작아지는 결과를 초래한다.

그림 10은 유입공기의 속도가 100 %, 분사량이 0.3



(a) $V_a=63$ m/s (b) $V_a=80$ m/s (c) $V_a=100$ m/s

[그림 8] Jet penetration injections at the low wall of the inlet ($T_i=298$ K, $Q = 0.3$ l/min)



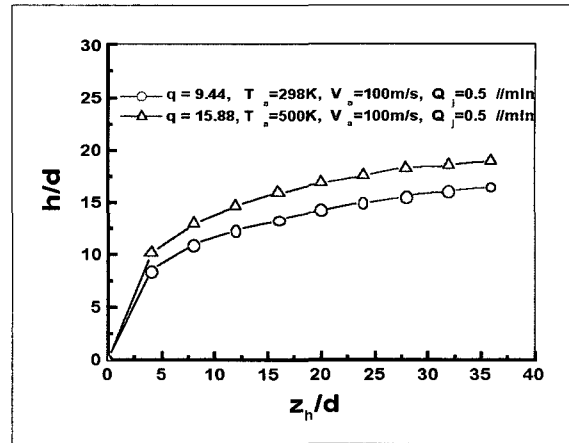
[그림 9] Effects of flow-rate of fuel on jet penetrations.



(a) $T_i=298$ K (b) $T_i=500$ K

[그림 10] Jet penetration injections at the low wall of inlet ($V_a = 100$ m/s, $Q = 0.3$ l/min)

l/min로 일정 할 때, 유입공기의 온도에 따른 침투 깊이의 변화를 나타낸다. 유입공기의 온도가 증가함에 따라 같은 분사조건에서 그 침투깊이가 증가하는데,



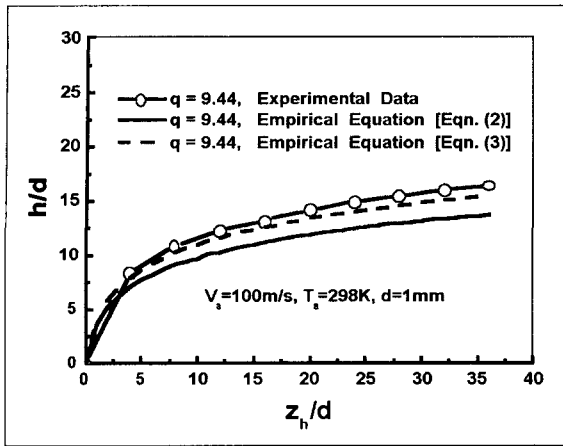
[그림 11] Effects of air temperature on jet penetrations.

이러한 현상은 유입공기의 밀도변화에 기인한다. 즉, 유입공기의 온도가 높아짐에 따라 밀도가 감소하고, 그 결과 공기의 운동량이 감소하여 유체의 침투깊이가 증가하게 된다. 그림 11은 그림 10을 정량화하여 나타내었다. 온도 상승에 따른 밀도의 감소는 미립화 성능을 감소시키고, 침투깊이를 증가시킨다.

Inamura 등(1991)은 공기흐름 중에(55~140%)물을 수직 방향으로 원형 분출구(0.5~2mm)를 통하여 분사속도 55~140m/s로 분사하여 공기 흐름 방향(Z)에 따른 침투깊이(X)의 변화를 식 (2)와 같은 실험식으로 나타내었다.^[13]

$$\frac{X}{D_0} = (1.18 + 0.24D_0) \left(\frac{\rho_j U_j^2}{\rho_a U_a^2} \right)^{0.36} \times \ln \left[1 + (1.56 + 0.48D_0) \frac{Z}{D_0} \right] \quad (2)$$

그림 12는 같은 분사조건에서 측정된 연료의 침투 깊이와 Inamura의 식에 의해 계산된 연료의 침투깊이를 비교한 것이다. 본 실험에서의 침투깊이의 측정치가 계산된 값보다 더 큼을 알 수 있다. 이러한 현상



[그림 12] Comparisons of jet penetration between measurements and calculations.

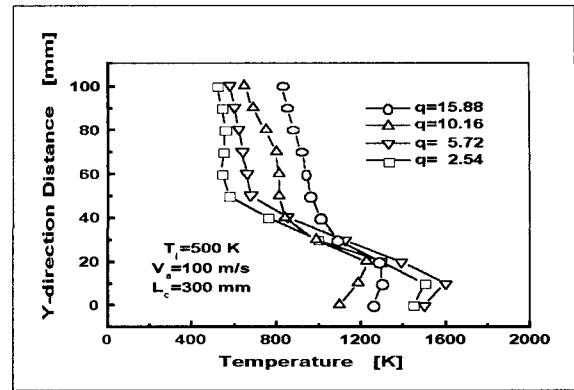
은 본 실험 조건 전반에 걸쳐 나타나는데 그 원인은 유입공기의 온도나, 유입공기의 속도, 그리고, 운동량비와 같은 실험조건이 본 실험과는 차이를 나타내고 있으며, 유입공기의 온도 변화와 같은 중요한 변수들이 무시되었기 때문이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 본 실험범위에서 연료의 침투깊이를 대표 할 수 있는 새로운 실험식을 식 (3)과 같이 제안한다.

$$\frac{X}{D_0} = (1.2 + 0.4D_0) \left(\frac{\rho_j U_j^2}{\rho_a U_a^2} \right)^{0.36} \times \ln \left[1 + (1.56 + 0.48D_0) \frac{Z}{D_0} \right] \quad (3)$$

그림 12에서 확인 할 수 있듯이 식 (3)에 의해 수정된 실험식이 실제 연료의 침투깊이를 더 정확하게 표현하고 있다.

3.3 출구 온도분포

실험 결과, 본 실험의 전 범위에서 연료의 최대 침투깊이는 20mm 정도에 불과하여 연료가 연소기 속에서 골고루 혼합되기에는 부족하다. 따라서 연료는 연



[그림 13] Temperature Profiles at the ram-combustor.

소기의 하부에 집중되어 있으며 전체적으로 일정한 혼합비를 유지하지 못하며 연소 시에 화염이 연소기의 한 방향에 편중 될 것임을 예측할 수 있다. 또한 동일한 운동량비의 조건에서 분사한 경우 거의 동일한 침투깊이를 가짐을 알 수 있다.

그림 13은 연소기 출구에서의 축 방향 온도를 보여 준다. 실험범위 전 영역에 걸쳐 연료의 농도분포가 아래로 치우쳐있는 까닭에 온도분포 또한 출구의 아래 쪽으로 편중되는 결과를 보여준다. 또한, 연소기 중앙의 속도가 크기 때문에 화염을 안정화시키지 못한다. 그 결과 연소기의 중앙에서 온도가 오히려 감소하는 경향을 나타내는데 이러한 현상은 연료 분사량(연료의 침투깊이)이 증가 할 수록 작아진다. 따라서 연소기 전체에 걸쳐 고부하의 안정된 화염을 얻기 위해서는 본 연구에서 제시한 실험식을 이용한 연료의 침투깊이에 대한 충분한 고찰이 먼저 선행되어야 한다.

4. 결 론

본 연구는 액체 램제트엔진의 개발에 있어서 연소

특성에 큰 영향을 미치는 수직분류의 분무특성에 대하여 연구하였다. 영상처리 기법을 이용하여 기류의 속도와 분류의 속도를 변화시켜 연료의 침투깊이를 측정하고 이를 정량화 하였으며, 침투깊이가 연소 형상에 미치는 영향을 고찰하였다.

연료의 침투깊이에 관한 고찰로서, 연료와 유입 공기의 운동량 유속비가 증가할수록, 유입 공기의 속도가 감소할수록, 그리고 유입온도의 온도가 증가할수록, 연료의 침투깊이는 증가하였으며, 본 실험 범위에서의 연료의 최대 침투깊이는 Inamura의 실험식과는 약간의 차이를 나타내고 있다. 이를 보정하기 위해 수정된 실험식을 식 (3)과 같이 제안하였다. 연소특성의 측면에서, 실험범위 전 영역에 걸쳐 연료의 농도분포가 아래로 치우쳐있는 까닭에 온도분포 또한 출구의 아래 쪽으로 편중되는 결과를 보여준다. 따라서, 연료의 침투깊이가 불충분할 때 화염은 안정화되지 못하며, 안정된 화염을 얻기 위해서는 연료분사 방법, 분사 위치, 분사압 등에 대한 충분한 고려가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] W. R. Jones, and G. R. Ranslem, "Firebird Ramjet Propulsion System Development", 8th JANNAF Combustion Meeting, III, 1981.
 [2] R. F. Salyer, "Flow Visualization and Experimental Optimization of three Inlet side dump Liquid-Fuel Ramjet Combustors",

Thesis, Naval Postgraduate School, Monterrey, CA, 1993.
 [3] 이상용 저, "액체의 미립화", 민음사, p46.
 [4] J. A. Schetz, P. W. Hewitt, and M. Situ, "Transverse Jet Breakup and Atomization with Rapid Vaporization Along the Trajectory", AIAA 596~603, 1985.
 [5] G. Bower, SAE Paper, No. 881318, 1988.
 [6] Takao Inamura, "Deformation of Liquid Jet Injected Normal to Subsonic Airstreams", JSME, Vol.86, No.634.
 [7] M. Adeleeng, "Mean Drop Size Resulting from the Injection of a Liquid Jet into a High-speed Gas Stream", AIAA Vol.6, pp. 1143~1147, 1968.
 [8] Arthur H. Lefebvre, "Atomization and Spray", Hemisphere Publishing Corp, pp.27~73 1989.
 [9] J. Manela, "Jet Penetration Height in Transonic Flow", AIAA, Vol.24, pp.67~73, 1986.
 [10] D. J. Hautman, "Transverse Liquid Injection Studies" AIAA, 9 0~1966, pp.1~8, 1990.
 [11] Takao Inamura, Masaki SASAKI, "Spray and Combustion Characteristics of a Liquid-fueled Ramjet Combustor", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.57, No.544, 1997.