고온, 고속기류 중에 수직 분사되는 연료제트의 분무 및 연소특성

Characteristics of the Spray and Combustion in the Liquid Jet

윤현진* 이근선** 이충원***

H. J. Youn, G. S. Lee, C. W. Lee

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 temperature distribution was slanted to the low wall of the ram-combustor. These trends gradually disappeared as the length and air temperature of the combustor became longer. Combustion efficiency increased when the length of the combustor was long and the air temperature was high. Especially, stable flame region is enlarged when the length of the combustor was long and the air temperature was high.Type Abstract here. Type Abstract here.

주요기술용어(Key Words): Spray Mechanism, Liquid-fueled Ramjet Engine, Vitiated Air Heater, Fluid Visualization, Jet Penetration, Combustion Efficiency, Flame Stability

1. 서 론

최근 액체 연료의 분사시스템에 있어서 연소실 내의 주류의 공기 유동이 미치는 영향을 최소화 하면서 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, 램제트 엔진이나 터보제트 엔진 등에 부착되는 after burner에서는 노즐에서 액체 연료를 기류에 대해 수직으로 분사하는 방법을 채택하고 있다.[1]

고속기류 중 수직으로 분사되는 액체 램제트 엔진에서의 분무과정은 다수의 복잡한 현상들이 상호 밀접하게 연결되어 있어 고난도의 복합적인 현상으로 나타난다.[2] 즉, 난류유동, 유동 입구각, 분무기구, 기하학적 특성, 분사유체역학, 혼합 및 화학반응 메카니즘 등이 밀접하게 관계되어 있으며,[3] 특히 분무 메카니즘의 관점에서, 분사되는 액체 연료는 유입되는 공기에 의하여 미립화 과정을 거치게 되고 그 후에 공기와 혼합되어 연소실내로 유입되게 된다. 이러한 미립화 과정과 혼합 메카니즘은 램제트 연소기에서의 연소성능에 큰 영향을 미치게 된다. 기체연료의 분사의 경우에는 연소상태는 거의 기류와 공기와의 혼합상태

* 경북대학교 기계공학부 대학원 박사과정
** 구미1대학 교수
*** 경북대학교 기계공학부 교수

에서 결정되어지지만, 액체 연료의 분사에서는 분사 후에 액주의 분열 및 미립화 과정과 혼합과정을 거치므로 기체 연료분사의 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 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.

하지만 기존의 연구들은 상온에서, 주류의 속도가 비교적 낮은 특정분사조건에서의 분무특성을 파악하는데 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 액체분류의 유량을 0.2 ℓ/min 에서 0.5 ℓ/min 까지 변화시켜, 주류와 연료의 운동량비에 따른 침투깊이를 측정하고, 이때의 액체 연료의 분무 및 연소특성을 알아보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

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

공기는 송풍기를 이용하여 공급되며 속도를 변화시켜 공급할 수 있도록 하였다. 측정된 송풍기의 공기 속도 범위는 연소기 입구에서 최대 120m/s 최소 63m/s이며, 실험 조건은 주류공기와 연료의 운동량비에 따른 침투깊이의 변화를 관찰하기 위해 63m/s, 80m/s, 100m/s의 세 가지 경우로 나누어 실험을 수행하였다.

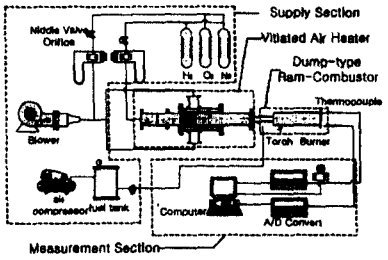

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

연료는 압축 공기에 의해 분사되며, 분사유량은 0.2 ℓ/min 에서 0.5 ℓ/min 까지 변화시켜 분사되도록 하였다. 사용된 연료 분사 노즐의 직경은 1mm인 단공노즐로 연소기 입구 100㎜ 전방, 벽면 하단부에서 분사된다.

본 연구에서는 연소실험 시에 사용되어지는 Dump형 연소기의 직경과 같은 당량 직경을 가지는 가시화장치를 사용하여 연료의 침투깊이를 측정하였다. 그리고, 연소기 입구의 유입공기의 온도를 변화시키기 위한 장치로 Vitiated Air Heater (VAH)를 사용하였다.

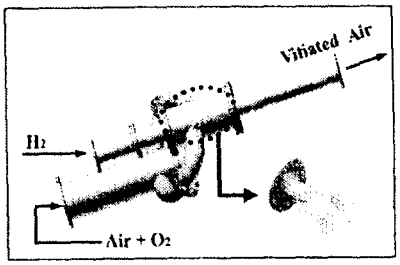

Fig. 2 Details of a Vitiated Air Heater

Fig. 2는 VAH의 개략도를 나타낸다. VAH는 고속의 공기를 수소와 산소를 혼합하여 연소시킴으로서 산소의 체적비율이 공기와 같도록 만든 일정온도의 Vitiated Air를 발생하기 위한 장치로, VAH 내부에서 연소과정을 거쳐 램제트 연소기로 유입되는 공기의 산소성분이 일반 대기중의 산소성분(20.9%)과 같아지도록 하기 위해 VAH로 유입되는 공기에 여분의 산소(Make-up Oxygen)를

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

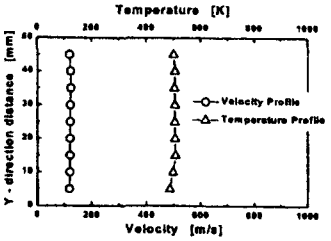

Fig. 3 Velocity and Temperature distributions at the inlet of a Ram-combustor ($\dot{m}_{Air}$ = 0.238 Kg/s)

Fig. 3은 특정조건($\dot{m}_{Air}=0.238Kg/s$, $\dot{m}_{H_2}=1g/s$)에서 램제트 연소기 입구에서의 공기의 속도분포와 온도분포를 보여주고 있는데, 공기흡입구 전 영역에 걸쳐 균일한 속도분포를 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서 연소기 유입공기의 온도나 속도의 불 균일성에 기인한 이상분무나 이상연소 현상은 없다고 가정 할 수 있다.

Table 1. Experimental Condition

VAH	Temp. of inlet(T_o) = 298, 500K Air velocity(V_o) = 63, 80, 100m/s Mass flow-rate = 0.238 kg/s
Fuel Injector	Flow-rate of fuel (Q_o) = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ℓ/min Dia. of injector tip(D_i) = 1㎜
Visualization apparatus	50㎜×50㎜×500㎜ (W×H×L) Visualization window × 3
Ram Combustor	Dia. of Combustor inlet (D_i) = 50㎜ Dia. of Combustor outlet (D_o) = 100㎜ Length of Combustor (Lc) = 300㎜

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 100㎜, 길이는 300㎜와 450㎜, 두 가지를 사용하였으며 공기 흡입구의 내경은 50㎜이다. 이상의 실험 조건을 정리하면 Table 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 존재함으로 분열현상도 상당히 복잡하게 형성된다.

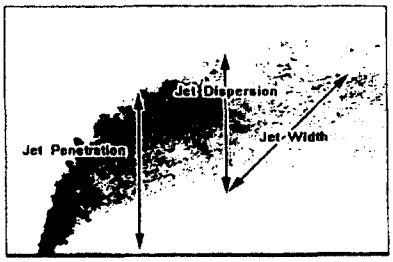

Fig. 4 The schematic instantaneous photography of a liquid jet

Fig. 4는 주위의 기류 속도가 100m/s이고 유입공기온도 500K, 그리고 주류와 연료의 운동량비(q)가 9.44인 경우, 액체제트의 분열형태를 순간사진으로 촬영한 것으로 액주 주위의 유동장과 액

주의 상대적인 속도에 따라서 침투깊이(hp)가 달라지게 된다.

3. 2 침투깊이 (Jet Penetration)

분무의 침투깊이(Jet Penetration Depth)는 정지된 기체 내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 최대거리를 의미한다. 이 침투깊이는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위기체에 의한 공기역학적 저항의 상대적인 크기에 의해서 결정된다. 램제트엔진의 경우 침투깊이가 너무 크면 압력손실이 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.

Fig. 5는 유입공기의 온도가 298K 속도가 100 ㎧일 때 분사유량 변화(운동량비)에 따른 침투깊이의 증가를 나타내고 있다. 연료의 운동량 유속비가 증가할 수록 침투깊이가 증가하는데, 그 증가량은 노즐 출구 영역에서 급격히 증가하며 하류로 내려 갈수록 침투깊이의 증가폭이 작아진다. 이러한 현상은 공기저항의 증가에 기인하는데, 분사된 연료의 큰 직경의 액적들은 작은 직경의 액적들 보다 운동량이 크기 때문에 높은 위치에 도달하게 되기 때문이다.

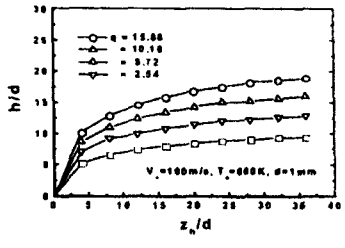

Fig. 5 Effects of fuel-to-air momentum ratio on jet penetrations. (V_a=100m/s, T_a=298K)

Fig. 6은 유입공기의 온도가 298K, 연료 분사량이 0.4 ℓ/min로 일정 할 때, 유입공기의 속도 증가에 따른 침투깊이의 변화를 나타낸다. 유입공기의 속도가 증가함에 따라 침투깊이가 감소하는데, 그 원인은 유입공기가 가지는 운동량이 클수록 분사 유체에 저항으로 작용하면서 미립화가 일찍 발생하게 된다. 즉, 공기의 속도가 증가 할수록 연료-공기의 운동량비는 작아지고 이는 연료 액적에 저항으로 작용하여 연료가 주류 공기 속으로 깊히 침투하지 못하는 결과를 초래한다.

Fig. 7은 유입공기의 속도가 100 ㎧, 분사량이 0.5 ℓ/min로 일정 할 때, 유입공기의 온도에 따른 침투깊이의 변화를 나타낸다. 유입공기의 온도가 증가함에 따라 같은 분사조건에서 그 침투깊이가 증가하는데, 이러한 현상은 유입공기의 밀도변화에 기인한다. 즉, 유입공기의 온도가 높아짐에 따라 밀도가 감소하고, 그 결과 공기의 운동량이 감소하여 유체의 침투깊이가 증가하게 된다. 결국, 온도 상승에 따른 밀도의 감소는 미립화 성능을 감소시키고, 침투깊이를 증가시킨다.

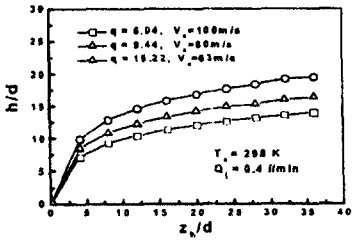

Fig. 6 Effects of flow-rate of fuel on jet penetrations.

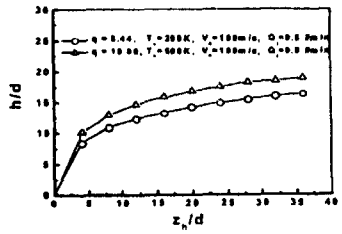

Fig. 7 Effects of air temperature on jet penetrations.

Inamura 등(1991)은 공기흐름 중에(55~140㎧)물을 수직 방향으로 원형 분출구(0.5~2㎜)를 통하여 분사속도 55~140㎧로 분사하여 공기 흐름 방향(Z)에 따른 침투깊이(X)의 변화를 식 (1)과 같

은 실험식으로 나타내었다.(7)

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

Fig. 8은 같은 분사조건에서 측정된 연료의 침투깊이와 Inamura의 식에 의해 계산된 연료의 침투깊이를 비교한 것이다. 본 실험에서의 침투깊이의 측정치가 계산된 값보다 더 큼을 알 수 있다. 이러한 현상은 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 (2)과 같이 제안한다.

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

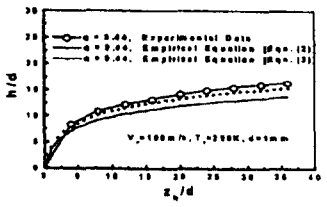

Fig. 8 Comparisons of jet penetration between measurements and calculations.

Fig. 8에서 확인 할 수 있듯이 식 (2)에 의해 수정된 실험식이 실제 연료의 침투깊이를 더 정확하게 표현하고 있다.

3.3 출구 온도분포

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

Fig. 9는 연소기 출구에서의 축 방향 온도를 보여준다. 실험범위 전 영역에 걸쳐 연료의 농도분포가 아래로 치우쳐있는 까닭에 온도분포 또한 출구의 아래쪽으로 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.

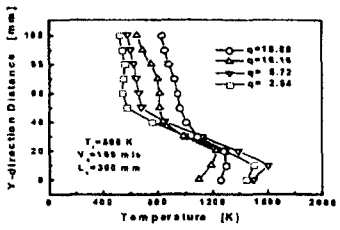

Fig. 9 Temperature profiles at the ram-combustor.

3.4 Flame Stabilization

Fig. 10은 유입공기의 온도와 연소기 길이에 따른 화염의 안정화 영역을 나타내고있다. 실험은 각 조건에서 화염이 blow-off되는 영역을 측정하여 화염안정의 하한계선(lean limit)을 표시하였다. 화염의 안정화 영역은 연소기 입구의 유입공기의 온도가 높을수록 넓어지는데 이는 램젯 연소기에서 산화제로 작용하는 유입공기의 온도가 높을수록 화염의 형성이 연료의 유량에 영향을 적게 받는다는 것을 의미한다. 또, 화염의 안정화 영역은 연소기의 길이기 길어질수록 증가하며, 그 원인은 연소기의 길이가 길어짐에 따라, 연료의 혼합성능이 향상되기 때문이다.

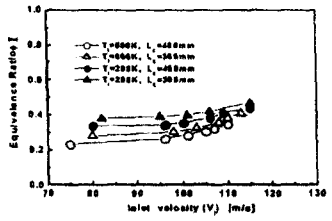

Fig. 10 Stability Loop of ram-combustor

4. 결 론

본 연구는 액체 램제트엔진의 개발에 있어서 연소특성에 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 (2)와 같이 제안하였다. 연소특성의 측면에서, 실험범위 전 영역에 걸쳐 연료의 농도분포가 아래로 치우쳐있는 까닭에 온도분포 또한 출구의 아래쪽으로 편중되는 결과를 보여주며, 이러한 형상은 연소기의 길이가 증가함에 따라 개선된다. 화염의 안정화 영역은 연소기의 길이가 길수록, 유입공기의 온도가 증가할수록 넓어지는데, 그 원인은 혼합성능의 증가와 산화제의 반응성 증가에 기인한다.

참 고 문 헌

1. George P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements" 6th ed., John Wily & Sons. inc., pp168~281,1992
2. W. R. Jones, and G. R. Ranselem, "Firebird Ramjet Propulsion System Development", 18th JANNAF Combustion Meeting,Ⅲ, 1981.
3. R. F. Salyer, "Flow Visualization and Experimental Optimization of three Inlet side dump Liquid-Fuel Ramjet Combustors". Thesis, Naval Postgraduat School, Monterrey, CA, 1993.
4. J. A. Schetz, P. W. Hewitt, and M. Situ, "Transverse Jet Breakup and Atomization with Rapid Vaporization Along the Trajectory", AIAA 59 6~603, 1985
5. G. Bower, SAE Paper, No. 881318, 1988
6. Takao Inamura, "Deformation of Liquid Jet Injected Normal to Subsonic Airstreems", JSME, Vol.86, No.634
7. 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