

수직분사제트에서 액적크기특성에 대한 실험적 연구

김민기* · 송진관* · 김진기* · 윤영빈**

An Experimental Study on Droplet Size Characteristics of Liquid Jets in Subsonic Crossflow

Min-Ki Kim* · Jinkwan Song* · Jinki Kim* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

A direct photograph measurement technique was used to determine the spatial distribution of the spray droplet diameter in subsonic crossflow and it also obtain that SMD distribution by using PLLIF technique. The injector internal flow was classified as three modes such as a normal, cavitation, and hydraulic flip. The objectives of this research are getting a droplet distribution and drop size measurement of normal flow and compare with the other flow effects. Although the study showed visually that drop size were spatially dependent of Air-stream velocity, fuel injection velocity, and normalized distance from the injector exit length.(x/d, y/d) There are also difference characteristics between cavitation, hydraulic flip and the normal flow.

초 록

횡단류 아음속유동장에서 연료의 수직 분사시 나타나는 액적영역의 액적들을 직접사진촬영으로 측정하고 PLLIF 실험을 통하여 얻은 강도 값으로 SMD분포를 측정하였다. 본 연구의 목적은 정상유동에서의 액적들의 크기 및 분포를 관찰하고, 캐비테이션 및 수력튀김 현상에 대한 액적들의 차이를 확인하는 것이다. 실험을 통하여 정상유동의 액적들은 분사차압, 공기의 유속, 침투거리, 인젝터 지름에 대한 하류방향 거리비(x/d)에 의하여 결정되며, 캐비테이션에 의한 난류강도, 유효지름에 따라 차이가 있음을 확인하였다.

Key Words: Transverse Injection(수직 분사), Cavitation(캐비테이션), Hydraulic flip effect(수력튀김현상), SMD(Sauter Mean Diameter ; 평균액적크기), PLLIF(Planar Liquid Laser Induced Fluorescence ; 평면 레이저 유도형광법)

1. 서 론

횡단류의 공기유동에 수직으로 분사하는 액체 연료 제트는 빠른 속도의 공기 유동장에서 구동하는 램제트 엔진이나 스크램제트 엔진, 가스터빈 엔진의 후기연소기(after burner)등 공기를 산화제로 사용하는 추진체의 연료 분사장치로 사

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: kmk34@snu.ac.kr

용되며, 이러한 추진 및 동력장치 이외에도 항공기 엔진의 성능향상 및 안정성을 위한 유동제어, 터빈블레이드 등의 막냉각, 연소불안정성을 보정하기 위한 2차 분사장치 유동의 능동제어 등에 이용된다. 일반적으로 횡단류 유동장에 수직으로 분사되는 연료의 분무 구조는 액주 영역(liquid column region), 다소 큰 액적이 존재하게 되는 영역(ligament region), 액적 영역(spray plume region, droplet)으로 정의할 수 있다.[1] 이러한 분무과정은 다수의 복잡한 형상들이 상호 밀접하게 연결되어 있어 복합적인 현상으로 나타난다. 특히 고속 유동장의 램젯 엔진에서 액체연료는 높은 밀도와 발열량으로 이용이 증가하고 있으나, 연료의 착화에 앞서 연료의 증발과 혼합의 시간을 필요로 하고, 불충분한 혼합 시간으로 인한 연료액적의 증발 및 혼합은 연소기의 성능저하와 화염의 불안정성을 초래하게 된다. 따라서 연료의 미립화 과정, 산화제와 연료의 혼합에 커니즘의 규명은 연소기의 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

Adelberg등[2]은 $WeRe > 10^6$ 이상인 가속파 영역에서 액적크기와 오리피스 크기 및 분열 과정과 관계된 실험식을 제시하였고, Ingebo등[3]은 Scanning radio meter의 기법을 사용하여 액주 영역에서 공력학적인 힘에 의해서 액주표면에 발생하는 파장을 연구하였고, $WeRe < 10^6$ 인 모세관 영역과 가속파 영역의 액적크기에 대한 관계식을 제시하였다., Kihm등[4]은 액적의 크기를 Malvern system으로 측정하여 공기의 유속, 연료분사 속도, 침투거리, 진행방향 거리, 등에 의한 변수를 Buckingham PI Theorem으로 실험식을 제시하였다. Wu등[5]은 PDPA기법으로 액적 영역의 SMD분포를 제시하였다. Sankar등[6]은 PLLIF에 의해 얻은 형광신호 및 산란신호의 강도값으로 SMD분포를 얻을 수 있는 식을 제시하였다. 그리고 Tamaki등[7]의 결과에서 캐비테이션 현상은 분열·분무 특성에 큰 영향을 주는 것으로 보고되었다. Song등[8]은 PLLIF 기법으로 액적 영역의 분무 구조에 대하여 연구하였다. 따라서 본 연구에서는 직접 사진촬영으로 인한 정상유동에서의 액적들의 크기 및 분포를 관찰하고,

캐비테이션 및 수력튀김 현상에 대한 액적들의 차이를 확인하고, PLLIF기법을 이용하여 SMD분포를 확인 하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 오리피스 설계

인젝터의 지름(d)은 0.5mm이며, 내부는 오리피스와 챔버로 이루어졌다. 챔버의 지름(D)은 12mm로 $D/d = 24$ 이다. 챔버와 오리피스의 접선 구간의 곡률에 따라 캐비테이션이 발생하는 유동과 발생하지 않는 유동이 결정되므로 유입구에 곡률이 없는 오리피스(sharp edged orifice)와 곡률이 있는 오리피스(round-edged orifice)를 대조군으로 설정했다. 곡률은 유입구의 반경(r)과 오리피스의 지름이 같은 $r/d = 1$ 로 하였는데 $r \geq 0.14d$ 일 경우 vena contracta가 형성되지 않아 캐비테이션이 발생하지 않는다. 곡률이 없는 인젝터는 오리피스 길이(L) 대 지름비(L/d)가 5, 20인 인젝터 두 가지를 실험하였다. 일반적으로 $L/d \leq 8$ 인 경우 수력튀김현상이 발생한다고 알려져 있으며, 캐비테이션과 수력튀김 현상을 확인하기 위하여 L/d 를 각각 다르게 제작하였다.

2.2 실험조건 및 방법



Fig. 1 Experimental Setup for PLLIF & Photograph Technique

우선 정상유동, 캐비테이션, 수력튀김현상이 나타나는 조건을 구하기 위하여 유량실험을 하여 유량 변화의 경향을 알아보았다. 또한 액적을 직접사진 촬영 기법을 통해 분석하고자 하여 Canon MP-E 65mm f/2.8 1-5x Macro Photo 접

사찰영 렌즈를 장착한 디지털 카메라(Canon EOS 20D)와 광원으로는 스트로보 스톱프를 동기화 하여 인젝터 외부 유동 현상과 Table 1에서의 조건과 같이 각각의 위치에서 액적을 촬영하였다. 이때 확대비는 pixel당 약 2 μ m 정도 확대하였고, 각 조건에 1000~2000개의 액적을 촬영하여 오차 범위를 10%안으로 들어오게 하였다. 그리고 SMD의 분포를 구하기 위하여 형광 신호와 산란 신호의 강도값을 얻을 수 있는 PLLIF 기법을 이용하여 분무 구조를 관찰하였다. Fig. 1은 PLLIF 실험의 장치와 사진촬영기법의 사진이다. PLLIF 실험을 수행하기 위하여 불과 에탄올을 4대 1로 섞고 Aldrich F245-6 형광 연료를 섞은 실험 연료를 사용하였다. 가시화 영역의 크기는 50mm x 50mm x 330mm 이며, 20마력 송풍기를 사용하여 60m/s의 공기를 불어 넣어 주었다. PLLIF 실험에 사용된 레이저는 Spectra-Physics의 아르곤-이온 레이저이며, 550nm 하이패스 필터와 514 \pm 5nm 밴드패스 필터를 장착한 디지털 카메라(Canon EOS D30)를 사용하였다.

Table 1. Experimental Condition

parameter	value
Air velocity	60 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	318 K (45 °C)
Fuel	Water : Ethanol = 4 : 1 (20%)
Orifice Diameter	0.5 mm
Orifice Shape	Round edged(L/d = 20), Sharp edged (L/d = 5, 20)
ΔP (bar)	1, 2, 3, 4, 5, 6
x/d	40, 60, 80, 100, 120

3. 실험결과 및 토의

3.1 조건별 유량 측정

캐비테이션 현상을 발생시키기 위해 45 $^{\circ}$ C로

상승시킨 실험연료에 대한 유량을 측정하였다. Fig 2는 분사압력을 1bar부터 6bar 까지 증가시키며 각각 인젝터들의 유량을 측정하고, 유량 계수(Discharge coefficient: Cd)를 구하여 연료의 속도에 따른 각 조건에서의 변화를 그린 그래프이다. 인젝터 모두 캐비테이션 현상이 발생하기 전에는 압력이 증가할수록 유량 계수가 서서히 증가하는 경향을 보여준다. 일정 압력이 되면 곡률이 있는 정상유동의 인젝터의 경우 압력이 증가하더라도 유량 계수는 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되었고, 곡률이 없는 인젝터의 경우 압력이 어느 정도 이상 높아진 경우 캐비테이션이 발생하면서 유량계수가 감소하게 된다. L/d = 5인 인젝터의 경우는 2bar부터 캐비테이션이 발생하여 유량 계수가 감소하다가 베나 콘 트랙타가 발전하여 유로와 유동이 분리되어 수력튀김 현상이 발생하여 유량 계수가 일정한 모습을 나타내었다.

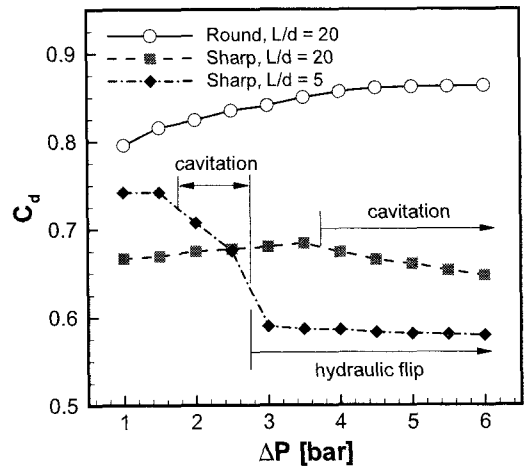


Fig. 2 Discharge Coefficient of each injection pressure difference

3.2 액적크기 측정

직접사진 촬영기법으로 정상유동의 경우 액적을 촬영하였다.

Fig 3은 정상유동에서 고 확대비를 이용하여 촬영한 액적들을 이미지 프로세싱 기법[9]을 통하여 얻은 SMD값이다. 본 실험과 같이

WeRe>10⁶인 가속파의 경우 오리피스 출구의 액주 영역에서 아랫부분의 분열과장이 윗부분의 분열과장의 크기보다 작게 되어 y/d값이 작아질수록 SMD는 작아지는 현상을 볼 수 있다.[2,3] 또한 분사차압의 증가로 인한 연료분무속도가 증가할수록 유동장에 침투거리가 커지므로 더 많은 영역의 응력 작용으로 액적이 분열하여 SMD는 작아지는 현상을 관찰할 수 있고, 액적이 공기유동 유동 방향으로 진행할수록 더 많은 공력학적 항력과 전단력에 의해 액적이 작아지는 현상도 관찰할 수 있다.[4]

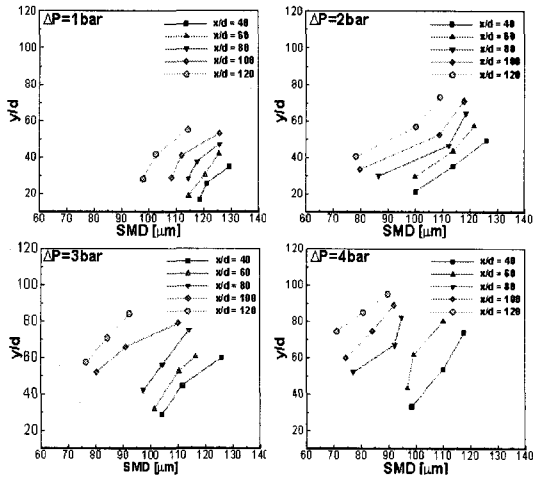


Fig. 3 SMD versus y for different injection pressure and normalized distance x/d at the normal flow

3.3 PLLIF실험을 통한 액적 분포

식 (1)과 같이 형광신호 및 산란신호의 비율은 액적의 세제곱과 제곱의 비율이므로 고 확대비와 이미지 프로세싱에 의한 정확한 액적측정으로 식(2)의 최종 상수 값을 도출하여 Fig 4와 같이 액적영역의 SMD분포를 얻을 수 있었다.

$$\frac{I_f(x,y)}{I_s(x,y)} = \frac{\phi}{k} \left[\frac{\sum N_i(x,y) D_i^3(x,y)}{\sum N_i(x,y) D_i^2(x,y)} \right] \quad (1)$$

$$D_{32}(x,y) = \frac{1}{k} \frac{I_f(x,y)}{I_s(x,y)} \quad (2)$$

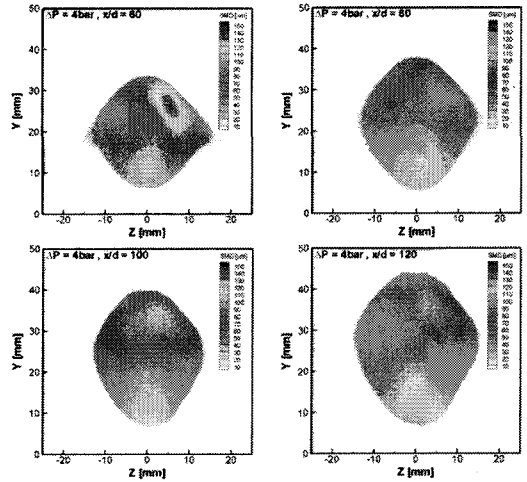


Fig. 4 Cross-Sectional distributions of SMD at normal flow, ΔP=4bar

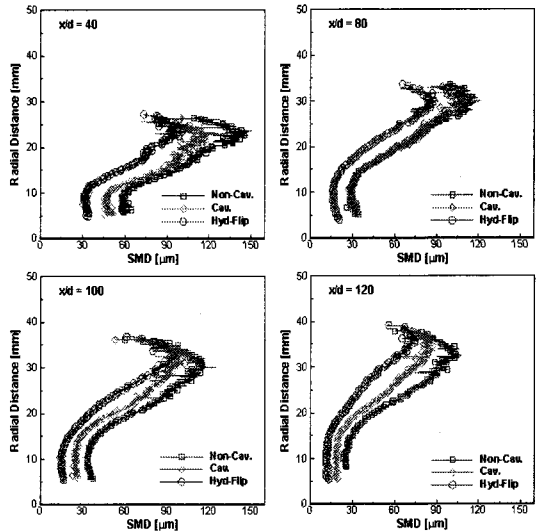


Fig. 5 Centerline properties at various axial locations of Normal, Cavitation, Hydraulic Flip flows ($v_f=21.05\text{m/s}$, $d=0.5\text{mm}$, $d_{\text{eff}}=0.44\text{mm}$)

그림에서와 같이 분사차압이 같은 조건에서 분무가 후류로 진행하면 SMD가 작아짐을 확인할 수 있고, 각각의 plume 영역에서 공기유동에 대한 액적들의 모멘트에 의해 큰 액적들이 상단에 분포하는 경향을 확인할 수 있고, 50 μm 이하의 아주 미세한 액적은 바닥으로 깔려 아래 부분에 분포함을 알 수 있다. 그림에서 분포에 대해 한

쪽 강도가 강해서 SMD값이 커짐을 확인 할 수 있는데 이는 실험에 사용된 레이저의 분포가 균일하지 않은 오차일 수 있다. Fig 5에서는 PLLIF 실험의 SMD분포의 결과, 분사속도의 조건이 일치한 상태에서 캐비테이션이 발생하게 되면 정상유동의 경우보다 난류강도가 강해져서 액적이 작아짐을 확인 할 수 있었다. 수력튀김 현상이 발생하면 정상유동에서의 경우보다 오리피스에의 유효지름이 77%가 감소하여 유량이 68%정도 배출하게 되어서 다른 경우보다 상대적으로 액적이 작아짐을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

수직분사제트의 액적크기특성에 대한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 실험을 통하여 액적은 연료분사 속도, x축, y축 방향 대 인젝터 지름비(x/d , y/d)와 Trajectory위치에 변수임을 확인 하였다.
2. 고 확대비 사진촬영으로 얻은 SMD값으로 형광신호 및 산란신호의 비율에 따른 액적 관계식의 상수 값을 도출하여 각각의 영역에서 SMD분포를 얻을 수 있었다.
3. PLLIF실험의 SMD분포의 결과, 조건이 일치한 상태에서 캐비테이션이 발생하게 되면 정상유동의 경우보다 난류강도의 증가로 액적이 작아짐을 확인 할 수 있었다.
4. 수력튀김 현상이 발생하면 정상유동에서의 경우보다 유효지름이 77%가 감소하여 유량이 68%정도 배출하게 되어 상대적으로 액적이 작아짐을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Schetz, J.A. and Padhye, A., "Penetration and Breakup of Liquids in Subsonic Airstreams", AIAA Journal, 15, 1385-1390, 1977.
2. Adelberg, M., "Mean Drop Size Resulting from the Injection of a Liquid Jet into a High-speed Gas Stream", AIAA J., vol. 6, no. 6, June 1968, pp. 1143-1 147.
3. Ingebo, R. D., "Effect of Airstream Velocity on Mean Drop Diameters of Water Sprays Produced by Pressure and Air Atomizing Nozzles", NASA TM-73740, 1977.
4. K. D. Kihm, G.M. Lyn, S.Y. Son, "Atomization of Cross-Injecting Sprays into Convective Air Stream", Atomization and Spray, vol. 5, pp. 417-433, 1995
5. Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Najad, A. S., "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol.14, No.2, pp.173-182, 1998.
6. S. V. Sankar, K. E. Maher, D. M. Robert, W. D. Bachalo "Spray Characterization Using a Planar Droplet Sizing Technique," ICLASS-97, August 18-22, 1997, Seoul
7. Tamaki, N, Shimizu, M, Nishida, K, and Hiroyasu, H, "Effects of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid Jet," Atomization and Sprays, Vol.8, pp.179-197, 1998.
8. 송진관, 수직분사제트의 액적영역 분무특성에 대한 연구, 한국액체미립화학회지, 제00권 제0호(2006)/63
9. 임병직, 고압환경에서 충돌분사 인젝터의 분무 미립화에 대한 실험적 연구, 서울대학교, 공학석사학위논문, 2003