

수직분사제트의 액적영역 분무특성에 대한 연구

송진관* · 안규복** · 오정석* · 윤영빈***

Spray Plume Characteristics of Liquid Jets in Subsonic Crossflows

Jin-kwan Song* · Kyubok Ahn** · Jeong-seog Oh* · Youngbin Yoon****

ABSTRACT

The effect of internal liquid flow on spray plume characteristics was performed experimentally in subsonic crossflows. The injector internal flow was classified as three modes such as a normal, cavitation, and hydraulic flip. The objectives of the research are to investigate the effect of internal liquid flow on the spray plume characteristics and compare the trajectory of spray plume with previous works. The results suggest that the trajectory of spray plume can be correlated as a function of liquid/air momentum flux ratio(q), injector diameter and normalized distance from the injector exit(x/d). It's also found that the injector internal turbulence influences the spray plume characteristics significantly.

초 록

아음속 횡방향 유동에 대한 수직 분사시 액적영역에 대한 내부 유동의 효과에 대하여 실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 액적영역의 내부유동 현상에 대하여 관찰하고, 이전 연구에 대하여 액적영역의 궤적을 확인하는 것이다. 실험을 통하여 액적영역의 궤적은 모멘텀 플럭스 비(q), 인젝터 지름에 대한 하류방향 거리비(x/d)에 의하여 결정되며, 인젝터 내부유동이 액적영역의 분무특성에 큰 영향을 미침을 확인하였다.

Key Words: Transverse Injection(수직분사), Spray Plume Resion(액적 영역), Cavitation, Hydraulic Flip(수력 튀김 현상), PLLIF(평면 레이저 유도 형광법)

1. 서 론

횡방향으로 흐르는 공기유동에 대하여 수직분사되는 액체제트 분무방법은 추진체계 특히, 터보제트 엔진의 애프터버너, 램제트, 스크램제트 연소기 등에 널리 이용되는 분무방법으로, 이 분무방법에 대한 연구는 많은 연구소 및 대학에서 진행되어 왔다. 특히 연소 효율을 증대하거나,

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
** 한국항공우주연구원 연소기그룹
*** 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: ges99@snu.ac.kr

유해오염 배출물을 저감하기 위하여 연료의 분무를 정확한 위치에 정확한 분무 분포를 구성할 수 있는 기술이 연구되어야 한다. 따라서, 액체 연료 제트분열과정, 액적 전이 동특성, 분무구조에 대한 연구가 이루어지고 있는 상태이다.

횡방향의 공기유동에 대한 수직연료분사는 세 영역으로 구분할 수 있다. 초기 분사직후 인젝터 노즐 형상을 그대로 유지하는 액주 영역(liquid column region), 분열이 시작되어 큰 액적이 존재하는 영역(ligament region), 미립화된 액적으로 이루어진 액적 영역(spray plume region)으로 나눌 수 있다[1]. Wu 등[1,2]는 액주과의 형성에 의한 액주 분열과 그와 별도로 액주 주변에서 직접 분열하는 표면 분열을 정의하였으며, 액주 분열의 분열점 위치와 분열 전까지의 관계식을 제안하였다. 또한 액적 영역의 분무 구조 분석을 시행하고, 그에 대한 특성 관계식을 제안하였다. 그러나 Wu 등[1,2]의 연구는 캐비테이션(cavitation) 등의 현상이 배제된 결과이며, Tamaki 등[3]의 결과에서 캐비테이션 현상은 분열·분무 특성에 큰 영향을 주는 것으로 보고되었다. Ahn 등[4]은 캐비테이션과 수력튀김 현상(hydraulic flip)이 액주 분열 과정에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하고, 각 현상에 대한 유효 지름(d_{eff}), 유효 속도(v_{eff})에 대한 도입을 설명하였다. 따라서 본 연구에서는 캐비테이션 등의

현상으로 인해 수직 제트의 액주 분열 이후 액적 영역에서의 d_{eff} , v_{eff} 에 대한 고찰을 수행하고, 액적 영역의 분무 구조에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 인젝터(Injection)

인젝터는 오리피스 내부의 유동을 관찰하기 위하여, 아크릴 소재로 제작하였으며 투명도를 높이는 표면처리를 하였다. 인젝터 내부는 오리피스와 챔버로 이루어졌다. 오리피스의 지름(d)은 0.5mm이며, 챔버의 지름(D)은 12mm로 $D/d = 24$ 이다. 캐비테이션이 발생하는 유동과 발생하지 않는 유동은 유입구의 곡률에 의해 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 베나 콘트랙타(vena contracta)가 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 구성하였다.

Table 1. Experimental Condition

parameter	value
Air velocity	60 m/s
Air temperature	300 K
Fuel temperature	318 K (45 °C)
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	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180

2.2 실험방법 및 조건

실험은 모두 세 단계로 수행되었다. 우선 캐비테이션에 의한 유량 변화의 경향을 알아보고 수

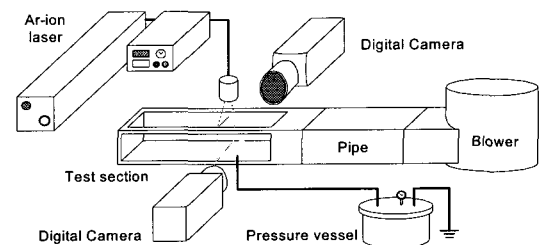


Fig. 1 Experimental Setup for PLLIF

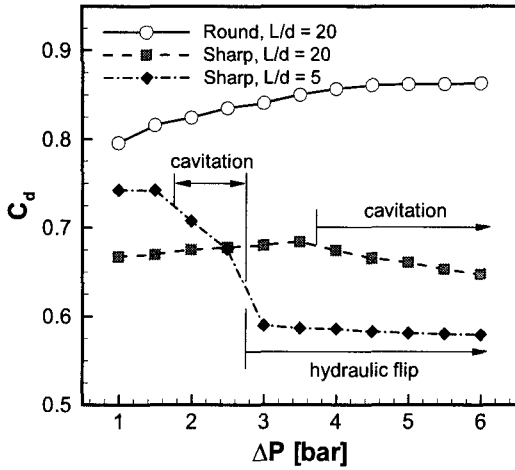


Fig. 2 Discharge Coefficient as a function of injection pressure difference

직 분사시 제트의 모멘텀 플럭스 비(q)를 구하기 위하여 각 인젝터의 유량 측정 시험을 수행하였다. 점사촬영 기구를 장착한 디지털 카메라 (Canon EOS 20D)와 스트로보 스크로프를 이용하여 인젝터 내부 유동과 내부 유동 현상에 따른 외부 제트의 특징을 관찰하였다. 그리고 위 두 실험을 통하여 파악된 유동 현상을 기준으로 PLLIF (Planar Liquid Laser Induced Fluorescence) 기법을 이용하여 분무 구조를 관찰하였다. Fig. 1은 개략적으로 나타낸 PLLIF 실험의 장치 그림이다. PLLIF 실험을 수행하기 위하여 물과 에탄올을 4대 1로 섞고 Aldrich F245-6 형광 염료를 섞은 실험 연료를 사용하였다. 가시화 영역(test section)의 크기는 50mm x 50mm x 330mm 이며, 20마력 송풍기를 사용하여 공기를 불어넣어 주었다. PLLIF 실험을 위한 레이저는 Spectra-Physics의 아르곤-이온 레이저이며, 실험 결과치를 얻기 위하여 550nm 하이패스 필터와 514±5nm 밴드패스 필터를 각각 장착한 디지털 카메라(Canon EOS D30)를 사용하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유량 측정

Figure 2는 분사압력 차이를 1bar부터 6bar 까지 0.5bar씩 증가하며 각각 실험 인젝터의 유량을 측정하고 그 결과를 이용하여 유량 계수 (Discharge coefficient: C_d)를 구하여 그린 그래프이다. 캐비테이션 현상이 잘 발생하도록 만들기 위하여 실험 연료를 45°C로 상승시켜 측정하였다. 각 인젝터 모두 캐비테이션 현상이 발생하기 전에는 압력이 증가할수록 유량 계수가 서서히 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 일정 압력 이상이 되면 곡률이 있는 인젝터의 경우 압력이 증가하더라도 유량 계수는 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되었다. 반면에 곡률이 없는 인젝터의 경우 압력이 어느 정도 이상 높아진 경우 캐비테이션이 발생하면서 유량계수가 감소하게 된다. 그러나 $L/d=5$ 인 인젝터의 경우 2bar 부터 캐비테이션이 발생하여 유량 계수가 감소하다가 베나 콘트랙타가 발전하여 유로와 유동이 분리되어 수력튀김 현상이 발생함에 따라 3bar부터 유량 계수가 일정한 모습을 나타내었다.

3.2 오리피스 내·외부 유동

유량 계수 곡선을 통하여 캐비테이션 현상과 수력 튀김 현상이 발생함을 예측할 수 있었다. 하지만 캐비테이션 현상과 수력튀김 현상이 발생하였을 경우 일어나는 오리피스 내에서 유동의 구조와 그 유동의 구조에 따른 오리피스 직후의 유동 현상에 대해서 직접 관찰할 필요가 있다. Fig. 3은 압력 증가에 따른 인젝터의 내부 유동과 외부 제트유동을 촬영한 사진을 정렬한 그림이다. 곡률이 있는 인젝터는 ΔP 가 증가하여도 내부유동에서 캐비테이션이 관찰되지 않았으며, 외부 제트유동에서는 ΔP 가 증가하였을 때 레이놀즈 수가 증가함에 따른 난류 효과가 관찰되었다. 반면에 곡률이 없으며 $L/d=20$ 인 인젝터에서는 3bar부터 캐비테이션이 발생하였다. 캐비테이션이 발생하면 발생하기 전의 깨끗한 유동에 비하여 난류 강도가 강해지는 모습을 관찰할 수 있었다. 하지만 유출구에서는 이미 유체가

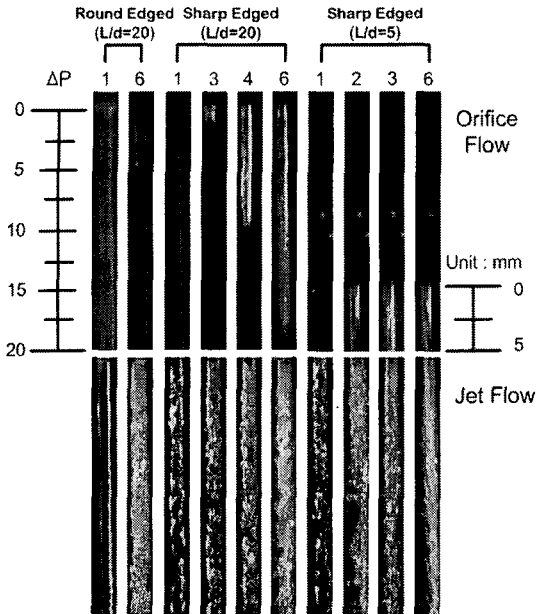


Fig. 3. Internal flows and external flows of 0.5mm orifices

벽면까지 채워져서 액주의 지름은 d 가 되는 것을 확인할 수 있다. 곡률이 없고 $L/d=5$ 인 인젝터는 2bar에서 캐비테이션이 발생하여 제트가 분열되며 심한 난류 성향을 보여준다. 그러나 $\Delta P=3\text{bar}$ 일 때 캐비테이션이 성장하여 수력튀김 현상이 발생하게 된다. 수력튀김이 발생하게 되면 심한 난류 형상을 보이던 제트 유동이 곡률이 있는 인젝터의 고압 상태의 제트 유동과 흡사한 모습을 나타내었으며, 제트지름 역시 인젝터의 지름 d 보다 작아졌다.

3.3 PLLIF 데이터를 통한 분무특성

Figure 4는 본 연구에서 비교 기준으로 삼은 Wu 등[2]에 제안된 아래 두 식을 도입하여 실험 결과와 비교한 것이다.

$$y_t/d = 4.3q^{0.33}(x/d)^{0.33} \quad (1)$$

$$y_m/d = 0.51q^{0.63}(x/d)^{0.41} \quad (2)$$

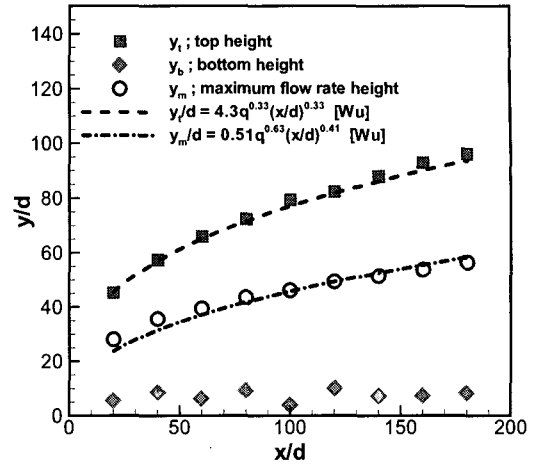


Fig. 4 Spray plume trajectory ; Comparison with Wu's result at $\Delta P = 2\text{bar}$

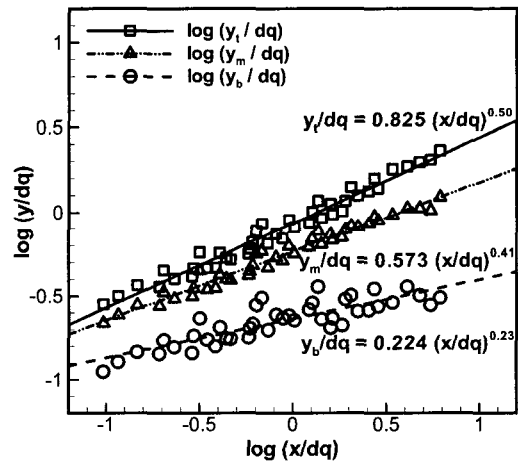


Fig. 5 Spray plume trajectory ; in case of y_t/dq , y_m/dq , and y_b/dq .

실험 결과는 곡률이 있는 인젝터의 경우로 Wu 등[2]가 진행한 실험과 같은 조건으로 진행한 결과이다. 그리고 Wu 등[2]는 $q=5.3-59.1$ 에서 실험하였으므로 그와 비슷한 조건인 $\Delta P=2\text{bar}$ ($q=62.9$) 일 경우의 실험치를 사용하였으며 분무 구조의 가장 높은 부분의 높이를 y_t , 최대 질 유량이 지나가는 높이를 y_m , 가장 낮은 부분의 높이를 y_b 로 정의하고 결과에 대한 분석을 하였다. 최대 질유량이 지나가는 높이 y_m 에 대한 실

험치는 기존 Wu 등[2]의 실험식과 상당히 일치하지만, 가장 높은 부분의 높이 y_t 가 다소 차이가 보임을 볼 수 있다. 이는 분무 구조에서 최대 질유량이 지나가는 코어에 가까이 갈수록 액적의 양과 크기가 커서 정확한 수치를 얻을 수 있는 반면에 분무의 가장자리로 갈수록 액적 크기가 작고, 양도 적어서 측정이 어렵기 때문이다. 또한 영역 구분에 대해서 기준이 동일하지 않아 다소 차이가 난 것으로 보인다. 그러나 Eq. 1 과는 계수의 차이가 있을 뿐 경향성에서는 동일한 양상을 보여준다. 하지만 Wu 등[2]의 실험이 낮은 q 의 범위에서 진행되었으며, 측정 위치를 많이 하지 않아 실제 전체 실험 결과와는 다소 차이를 보여주었다.

Figure 5는 곡률이 있는 인젝터의 y_t , y_m , y_b 각각에 대한 $x/dq - y/dq$ 그래프를 도시한 것이다. 실선으로 그려진 결과는 y_t 에 대하여 도출된 관계식으로 Ahn 등[4]에서 사용한 Eq. 3에 대하여 계수가 약간 차이가 나는 거의 같은 결과가 나왔다. 이는 Wu 등[1]에서 설명한 액주 또는 액적이 공력학적 항력에 의하여 휘어지는 궤적의 관계식에 대하여 액주 즉, 실린더 형상의 항력 계수와 액적 즉, 구 형상의 항력 계수의 차이에 의한 것으로 보인다. 최대 질유량에 대한 높이 y_m 은 이점 채선으로 그려진 것으로 Eq. 2와 상당히 일치하는 관계식을 나타내고 있다. 마지막으로 점선으로 그려진 y_b 는 미세한 액적이 다량 분포하는 영역으로 실제 측정이 어려운 액적

$$y/dq = 1.297(x/dq)^{0.509} \quad (3)$$

$$y_t/dq = 0.825(x/dq)^{0.50} \quad (4)$$

$$y_m/dq = 0.573(x/dq)^{0.41} \quad (5)$$

$$y_b/dq = 0.224(x/dq)^{0.23} \quad (6)$$

크기가 다량 분포하여 아주 미세한 액적은 바닥으로 깔리는 현상을 실험에서 보여주긴 하였으

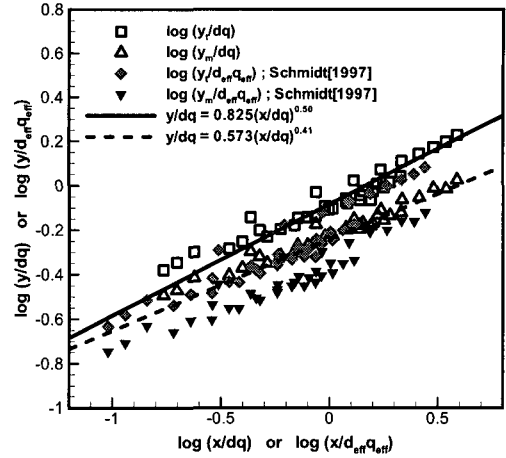


Fig. 6 Spray plume correlation; Cavitation

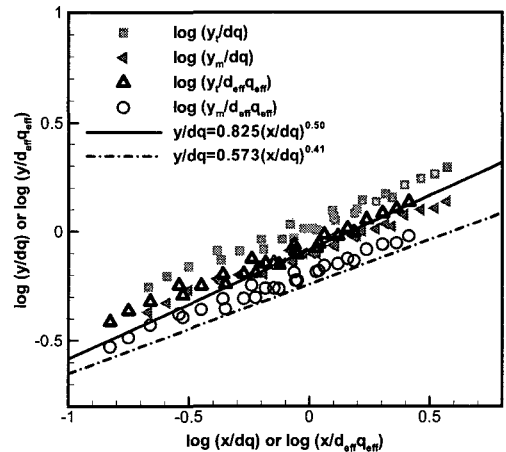


Fig. 7 Spray plume correlation; Hydraulic flip

나 측정이 가능한 액적 크기에 대하여 도출된 관계식은 Eq. 6이다.

Figure 6는 캐비테이션이 발생한 경우에 대하여 Eq. 4를 로그 척도로 변환한 식에 비교한 그림이다. 이러한 액주분열 이후의 결과는 Ahn 등[4]의 액주분열 전의 캐비테이션이 발생한 경우에서의 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 그러므로 캐비테이션이 발생하는 경우에 있어서 d 와 q 를 그대로 사용하는 것이 타당한 것으로 생각된다. 바꾸어 말하면, $d_{eff,cav} = d$, $q_{eff,cav} = q$ 라고 생각할 수 있다.

Figure 7 역시 Ahn 등[4]에서 제시된 수력튀

김 현상이 발생하였을 때 액주 분열 이전의 현상과 액적 영역의 현상과 일치함을 나타내고 있다. 색이 찬 도형으로 도시한 결과는 d 과 q 를 그대로 사용하여 구한 것이고, 내부가 빈 도형으로 도시한 결과는 Ahn 등[4]에 있는 $d_{eff,hyd}$, $v_{eff,hyd}$ 를 이용한 $q_{eff,hyd}$ 를 사용한 것이다. 결과적으로 $d_{eff,hyd}$ 과 $q_{eff,hyd}$ 를 사용한 결과가 Eq. 4에 부합한다는 Ahn 등[4]의 결론과 동일함을 보여준다. 이러한 Fig. 6와 Fig. 7에 관한 결과는 궤적에 대한 관계식은 출구에서의 액주의 지름과 액주의 출구 속도에 대해 지배된다는 사실을 보여준다.

4. 결 론

수직분사제트의 액적영역 분무특성에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 액적영역에 대한 분무의 주요 파라미터 y_t , y_m , y_b 는 x축 방향 대 인젝터 지름비(x/d)와 모멘텀 플럭스 비(q)로 관계식을 도출하였다.
2. 액주 분열 현상에서 캐비테이션 현상과 수력 튀김 현상이 발생하였을 때에 대한 Ahn 등 [4]의 결과는 액적 영역으로 확장하여 고려할 수 있다.
3. 액적 영역의 궤적은 출구에서의 액주 지름과

액주의 출구 속도에 대한 모멘텀 플럭스 비에 의하여 결정된다.

참 고 문 헌

1. Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Najad, A. S., "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.13, No.1, pp.64-73, 1997.
2. 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.
3. 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.
4. K. Ahn, J. Kim, Y. Yoon, "Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip," will be published in *Atomization and Sprays*, Vol.16, No.1, 2006.