

아음속 횡단류에 수직 분사되는 분무의 액적크기 및 속도 분포 특성

이인철* · 조우진* · 이봉수* · 김종현** · 구자예***

Droplet Sizes and Velocities from Single-Hole Nozzle in Transversing Subsonic Air-stream

In-Chul Lee* · Woo-Jin Cho* · Bong-Su Lee* · Jong-Hyun KIM** · Ja-Ye Koo***

ABSTRACT

The spray plume characteristics of liquid water jet injected into subsonic cross-flow at 42 m/s were experimentally investigated. Nozzle has a 1.0 mm diameter and $L/D=5$. Droplet sizes, velocities, volume flux were measured at each downstream area of the injector exit using phase Doppler particle anemometry. Measuring probe position is moved with 3-way transversing machine. Experimental results indicate that SMD is varied from 75 to 120 μm distribution and it is uncertain layer structure. SMD peaks at the top of the spray plume. This phenomenon is related to the momentum exchange between column waves and cross-flow stream. Droplet vector velocities were varied from 11.5 to 33 m/s. A higher-velocity region can be identified in down edge region at $Z/D = 40, 70$ and 100. Lower-velocity region were observed on bottom position of the spray plume. Volume flux is a criterion to the droplet concentration. All volume flux distribution has a same structure that continuously decreases from the center region to the edge of the plume. $Z/D = 20$ is spatially less concentrated than in $Z/D = 100$.

Key Words: Cross-flow(횡단류), SMD(Sauter mean diameter), Volume flux(체적유량)

1. 서 론

효율적인 연소와 배기가스의 오염물질을 줄이기 위해서는 특정 영역에서 미립화된 연료의 제어가 필수적이다. 횡단류에 분사되는 액체 제트 분무 특성에 대한 연구는 터보제트 보조장치,

램제트, 스크램제트 등 항공엔진 장치에 응용되어지고 있으며 이러한 연소기들의 연소효율은 액체제트의 혼합된 분무 미립화 과정과 밀접하게 연관되어 있다[1]. 연소장치에 분사된 연료의 액적분포도는 연료의 연소율, 기화, 혼합을 결정하는 중요한 인자가 되며 엔진의 성능과 효율에 궁극적인 영향을 미치게 된다[2,3]. 분사된 액체제트는 1차 분열과 2차 분열과정을 통해 더욱 미립화되며 유동장의 위치와 형태가 모멘텀비(q)와 웨버수(We)에 의해서 결정된다[4]. 미립화 과정에 대한 현상과 분무 특성을 파악하기 위해서

* 한국항공대학교 대학원

** 경원전문대 자동차학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처자, E-mail: jykoo@hau.ac.kr

TEL : (02)300-0116

는 실제 액체 연료의 실험이 필요한 실정이다. 초음속 횡단류 내에서의 분무 거리별 특성에 대한 연구는 국외에서 진행 되었지만 아음속 횡단류 내에서의 분무 거리별 특성에 대한 연구는 많이 부족한 실정이기 때문에 분무 거리별 단면 분포 특성을 연구하고자 한다.

2. 실험조건 및 실험장치

2.1 실험 조건 및 가정

실험실의 온도 및 습도는 평균적인 대기의 조건으로 297±3 K, 1±0.1 atm이라 하고 테스트 섹션(Test section)에서의 온도, 습도, 압력을 일정하다고 가정하며 액체 제트에 작용하는 중력의 영향은 무시하였다. 실험 조건에 대한 물과 공기의 물성 및 노즐의 기본 사양을 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험 장치 및 실험 방법

Figure 1은 실험장치의 전반적인 개략도를 나타낸 것이다. 본 실험은 테스트 섹션 크기가 120 mm(H)×120 mm(W)×350 mm(L)인 축류 흡입식(Axial suction type)풍동을 사용하였으며 위상 도플러 입자 분석기(PDPA)를 이용하여 SMD(Sauter mean diameter), 액적 속도(Droplet velocity), 볼륨 플럭스(Volume flux)를 측정하였다. 투과부(Transmitter)와 수광부(Receiver)는 30°의 각도 유지와 수평유지를 위해서 동일한 축으로 고정되었으며 각 축(X/D, Y/D)에 대하여 2.5 mm씩 이동하면서 데이터를 획득하였다. PDPA의 정확도와 오차 보정(Calibration)을 위하여 액적 발생기(Droplet generator)와 가습기를 이용하였고 실험 결과의 불확실성을 줄이기 위해 액적의 평균적인 측정 개수는 각 지점에서 10000개 이상으로 하였으며 횡단 분무 방향의 측정위치는 Z/D 20, 40, 70, 100로 수행하였다. Fig. 2는 실제 스프레이 이미지와 횡단별 측정 위치를 나타낸 것이다.

Table 1. Test environment conditions and Nozzle properties.

	Water	Air
Temperature(°C)	20	20
Density(kg/m ³)	998	1.21
Viscosities(kg/m/s)	1.0×10 ⁻³	1.81×10 ⁻⁵
Surface Tension(N/m)	0.0727	-
Orifice Diameter(mm)	1.0	
Orifice Length(mm)	5.0	

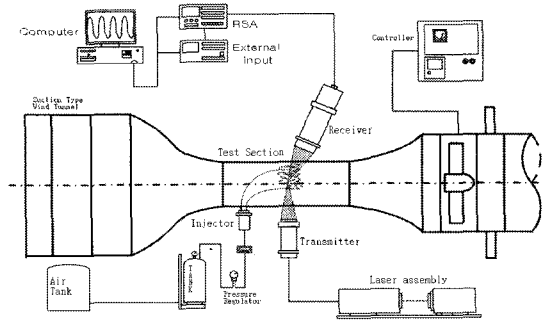


Fig. 1 Schematic of image capturing system & suction type wind tunnel

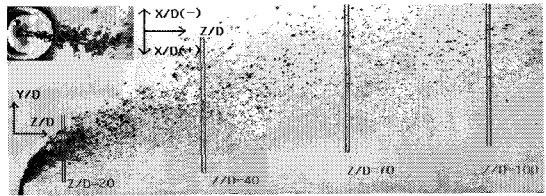


Fig. 2 Spray image of liquid jet in cross-flow

3. 결과 및 고찰

액체 제트의 분무 앞단(Windward)에서는 횡단류의 유동이 교란되고 액주와 충돌하여 액주 분열을 가속화하며 액주를 지난 횡단류는 액체제트 후단의 양쪽 영역에서 서로 반대방향의 와류를 발생시켜 액주에서 떨어져 나간 액적들을 더 작게 미립화하는 2차미립화 과정을 진행시킨다. 실험에서는 액체와 기체의 상호작용의 지표로서 액체의 표면장력과 기체의 관성력의 비인 웨버수(We)와 모멘텀비(q)를 일정하게 유지하였다.

$$We_a = \frac{\rho_a V_a^2 D}{\sigma_l}, \quad q = \frac{\rho_l V_l^2}{\rho_a V_a^2}$$

3.1 액체 제트의 단면 분포 특성

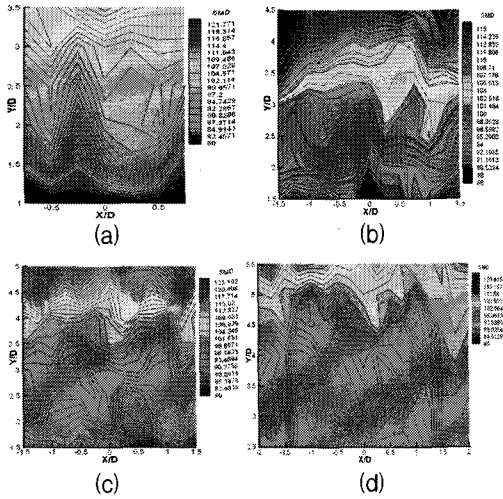


Fig 3. Cross sectional distribution of SMD. (a) $Z/D=20$, (b) $Z/D=40$, (c) $Z/D=70$, (d) $Z/D=100$ $We_a=29.92$, $q=25.1$

Figure 3은 횡단 거리별 SMD 단면 분포도이다. $Z/D=20$ 은 액주에서 분열된 액막이 빠르게 분열되는 구간으로 중간 영역의 SMD 분포는 $90\sim 105\ \mu\text{m}$ 로 분포한다. $Z/D=40$ 에서 상부영역의 SMD가 커지는 이유는 $Z/D=40$ 미만의 구간에서의 작은 액적들의 응집 때문이며 $Z/D=20$ 구간에서 상부의 큰 액적들이 PDPA의 측정부(Probe)를 벗어나 측정되지 못하고 횡단류와 충돌하여 좀 더 분열을 거친 후에 $Z/D=40$ 미만의 구간에서 측정 가능한 크기로 분열되어 측정된 것이다. SMD의 단면 분포는 층상 구조를 지나며 상층부의 SMD가 가장 크게 나타나며 $100\ \mu\text{m}$ 대의 SMD 분포가 중간 영역에 넓게 나타난다. $Z/D=70$ 의 SMD 분포는 $Z/D=40$ 과 비슷한 층상 구조의 경향성을 보이며 측정 영역은 $Y/D=0.5$ 정도 더 높게 나타난다. $Z/D=100$ 에서는 $Z/D=70$ 보다 층상 구조가 더 넓고 안정적으로 분포하며 상층의 SMD는 조금 더 분열되어 $Z/D=70$ 보다 약간 작아진다. SMD는 더 이상 작아지지 않고 $90\sim 105\ \mu\text{m}$ 정도의 균일한 경향성을 보이며 일정한 수치를 보인다. $Z/D=100$ 이상에서도 횡단류에 의한 액적 분열이 진행되는 하지만 이러한 영향을 그리 크지 않다. 만일 테스트 섹션 내의 횡단 유속이 증가한다면

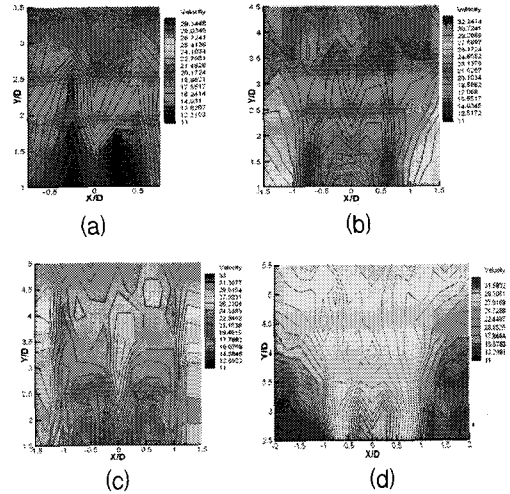


Fig 4. Cross sectional distribution of Velocity. (a) $Z/D=20$, (b) $Z/D=40$, (c) $Z/D=70$, (d) $Z/D=100$ $We_a=29.92$, $q=25.1$

액적의 분열은 더욱 활발해 지고 SMD는 더욱 작아질 것이다. 운동량 교환에 따른 미립화된 액적들은 큰 횡단류의 운동량을 지니지 않으면 횡단류 유동내로의 깊숙한 침투를 할 수 없다. 액적은 항상 유동의 흐름에 대하여 수직방향으로 침투하며 초기의 큰 액적들은 큰 운동량 때문에 분무의 외곽 영역에 분포하게 된다. 그래서 윗부분의 액적 직경이 점점 커지는 층상 구조의 분포가 나타나는 것이며 상부의 큰 액적의 수직 운동량과 액적 크기에 따른 큰 저항 때문에 아랫부분 보다는 작은 수평속도를 보인다. Fig. 4는 횡단 거리별 속도 단면 분포도이다. $Z/D=20$ 의 속도 분포는 아래 영역에서 양쪽 대칭으로 나타나며 중간 이상 영역에서는 약 $22\ \text{m/s}$ 로 고른 분포를 보인다. $Z/D=40$ 에서는 액적들의 수평 운동량의 교환으로 속도가 증가하였다. 바깥 영역에서는 빠른 속도 분포를 보이고 중심 영역에서는 가장 적은 속도 분포를 보였다. 상대적으로 $Z/D=20$ 보다 안정적인 속도 분포를 보이며 대칭으로 속도 분포가 나타난다. $Z/D=70$ 은 $Z/D=40$ 과 동일한 경향을 보이지만 최소 속도가 약 $6\ \text{m/s}$ 더 증가하였으며 바깥 영역의 최대속도에 대한 영역도 $Y/D=3.5$ 까지 증가했다. $Z/D=100$ 의 경우 경향성은 $Z/D=40, 70$ 과 동일하며 최대 속도의 영역이 중심으로 이동하는 경

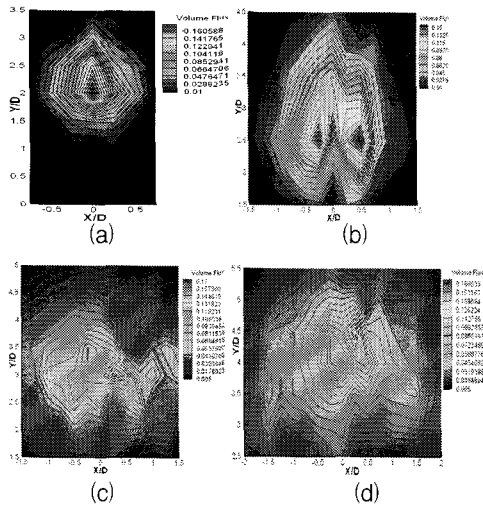


Fig 5. Cross sectional distribution of Volume flux. (a) $Z/D=20$, (b) $Z/D=40$, (c) $Z/D=70$, (d) $Z/D=100$ $We_a=29.92$, $q=25.1$

향이 보인다. 횡단류 속도 42.3 m/s의 유동에 수평으로 진행되는 액적들의 최대 속도가 33 m/s로서 약 10 m/s 정도 차이가 있는데 이는 공기의 항력, PDPA의 오차, 액적에 포함된 수직 속도성분 때문인 것으로 파악된다. Fig. 5에서는 횡단 거리별 Volume flux에 대한 단면 분포도를 나타내었는데 $Z/D=20$ 의 Volume flux는 중심에서 최대 0.158cc/s/cm²로 나타나며 Volume flux는 분무의 중심에서 분무 외곽 영역으로 갈수록 감소한다. 그리고 큰 Volume flux는 높은 액적의 집중 영역을 나타내고 분사된 액체의 명확한 양을 포함한다. 측정된 Volume flux들은 $Z/D=20$ 에서 가운데 영역에 집중되다가 $Z/D=40$ 에서 밖으로 갈라지며 다시 집중되었던 분무가 퍼지는 현상을 보이는데 각각 그 양이 틀려진다. 중심영역의 큰 Volume flux는 큰 분사압에 대하여 적게 휘어진 액체 제트에 의해서 얻어지며 Z/D 가 증가 할수록 분무 중심에 대한 Volume flux는 작아지는 것을 확인할 수 있다. $Z/D=70$ 에서 중심 영역의 Volume flux는 0.07cc/s/cm²로 $Z/D=40$ 의 Volume flux 보다 작게 나타나는데 그 이유는 분무 영역이 넓어지기 때문이다. $Z/D=100$ 에서 중심 영역의 Volume flux는 $Z/D=70$ 의 Volume flux 보다 작게 나타나기는 하지만 그 수치는 전반적으로 비슷하며 이를 바

탕으로 분무 영역이 계속 넓어지다가 일정해 진다는 것을 판단 할 수 있다.

4. 결 론

첫째, SMD 분포는 불규칙한 층상구조로서 Y/D가 증가 할수록 SMD도 같이 증가하게 되며 횡단류의 유속이 증가하면 액적이 분열되어 SMD도 작아지게 된다. 분무장은 횡단류 방향으로 진행 할수록 넓어지며 횡단 거리별 SMD 분포는 거리가 증가 할수록 전반적으로 넓게 퍼지며 일정한 수치를 보인다.

둘째, 횡단 거리에 따른 속도 분포영역을 파악할 수 있었는데 횡단 거리가 증가 할수록 상대적으로 빠른 속도는 분무 가장자리 영역에서 측정되었으며 낮은 속도는 분무 중심 아래 영역에서 측정되었다.

셋째, Volume flux는 분무의 중심에서 외곽으로 갈수록 증가한다. 횡단 거리별 분무 유동장 측정 결과 Z/D 가 증가함에 따라 분무 중심이 갈라졌으며 갈라진 분무 중심이 다시 넓게 퍼지는 현상을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. May Y. Leong, Vincent G. McDonell, and G.S cott Samuelsen., "Mixing of an Airblast-Atomized Fuel Spray Injected Into a Crossflow of Air," NASA CR-2000-210467
2. Pei-Kuan Wu, Kelvin A. Kirkendall, and Raymond P. Fuller., "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 2, March-April 1998
3. K. C. Lin, P. J. Kennedy, T. A. Jackson., "Spray Structures of Aerated-Liquid Jets in Subsonic Crossflows," AIAA Meeting & Exhibit, 8-11 January 2001/Reno, NV
4. Inamura, T., and Nagai, N., "Spray Characteristics of Liquid Jet Transversing Subsonic Air stream," Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 6, pp. 798-803, 1994