

論文

아음속 횡단 기체 유동장에서 노즐 형상 변화와 분사각 변화가 액적크기와 침투거리에 미치는 영향

이봉수*, 고정빈*, 조우진*, 구자예**

Effect of Injection Angle and Length to Diameter Ratios on Drop and Penetration Characteristics in Cross-flow

Bong-Soo Lee*, Jung-Bin Ko*, Woo-Jin Cho* and Ja-Ye Koo**

ABSTRACT

The spray characteristics of liquid jet injected into subsonic cross-flow were investigated experimentally. Spray trajectories were captured using CCD camera. Droplet sizes were measured using PDPA and Image Express. The nozzle diameter was 0.5 mm, and its length-to-diameter ratios (L/D) ranged from 1.0 to 6.0. Experimental results indicate that the breakup point is delayed by increasing gas momentum ratio and the penetration length is decreased by increasing Weber number. At low injection angle ($\theta < 90^\circ$), Weber number is dominant parameter for trajectories, but at high injection angle ($\theta > 90^\circ$), L/D is dominant parameter for trajectories rather than Weber number.

초 록

횡단 유동장내에서 일어나는 분무 현상에 대하여 분사각 변화에 대한 특성과 단일 노즐 형상에서 노즐의 크기와 길이에 대한 분무 특성을 연구하였다. 노즐은 단일 구멍으로 직경이 0.5 mm이고 노즐 대 노즐길이의 비(L/D)는 1.0에서 6.0이며 이미지는 고해상 줌렌즈를 이용한 CCD 카메라를 통해 얻었으며, SMD와 액적의 속도는 PDPA와 상용 프로그램인 Image Express를 사용하였다. 액체 제트의 궤적은 웨버수와 모멘텀비, 노즐형상 변화(L/D)에 영향을 받아 액주가 후방으로 휘어지는 현상이 나타났다. 분사각이 낮을 때 ($\theta < 90^\circ$)에 노즐 형상보다는 웨버수 증가가 액체 제트의 궤적에 더 크게 영향을 미쳤으며, 분사각이 높을 때 ($\theta > 90^\circ$)에 노즐 형상 변화에 의한 분열점 변화가 액체 제트의 궤적에 더 크게 영향을 미쳤다.

Key Words : Liquid column(액주), Breakup point(액주 분열점), Cross-flow(횡단기체), Momentum ratio(모멘텀비), Weber number(웨버수), Penetration length(침투 길이)

1. 서 론

연소장치에서 분사된 연료액적의 미립화와 연료분포는 다음 단계의 기화 및 혼합, 그리고 분무연소율을 결정하는 인자이며, 궁극적으로는 엔진의 효율과 성능에 큰 영향을 미치게 되므로,

† 2006년 1월 12일 접수 ~ 2006년 5월 18일 심사완료

* 정희원, 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : jykoo@hau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

이러한 복잡한 액체 연료의 미립화 현상을 파악하기 위해서는 실제 실험을 통한 액체 연료의 미립화 모델의 정립이 필요하다. 그러나 액체 제트의 미립화는 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 이 과정을 명확히 해석하는데 있어서 큰 어려움이 따른다. 또한 이러한 미립화 과정은 초기 액적 분열(primary breakup) 직후 액주의 분열과 동시에 2차 분열(secondary breakup)과정을 통해 더욱 세분화 되며 이 과정들은 초기 액적 분열과는 완전히 다른 메커니즘을 갖고 있다. 횡단류 제트는 복잡한 메커니즘으로 인하여 많은 연구가 진행되었고 진행 중이다[1-2].

기존의 연구에서는 높은 횡단 기체 속도에서 유동 방향에 수직으로 분사되는 액체 제트의 분무 특성에 대하여 많은 결과를 얻었지만 분사각의 변화를 갖는 액체 제트에 대한 연구와 낮은 횡단 기체 속도에 대한 연구가 많이 부족하다. 낮은 횡단 기체에서 액체 제트의 분무 및 미립화, 액적의 분포를 규명한다면 연소실 벽면의 열 전달 문제나 연소효율 해석 활용이 가능하다.

본 연구에서는 노즐의 형상, 횡단류의 속도와 분사각에 따른 분무특성을 나타내기 위해 CCD 카메라를 이용하여 가시화 실험을 하였고 PDPA를 이용하여 액적의 직경과 속도를 측정하여 분무 특성을 분석하였다. 결과를 비교하기 위하여 횡단류 기체와 액체제트 사이의 모멘텀비와 유동 가스의 모멘텀에 의한 관성력과 액체제트의 표면장력의 비인 웨버수를 통하여 무차원화 하였으며 이들을 이용하여 액체 제트의 궤적과 분열점(breakup point), 분무궤적(trajjectory) 및 액적의 SMD(Sauter Mean Diameter) 등에 대한 실험 결과를 바탕으로 횡단류 내부에 분사되는 액체 제트의 분열 및 분무 특성을 규명하였다.

II. Cross-flow 분무 실험 방법

2.1 실험 방법

축류 흡입식(Axial suction type) 풍동을 이용하여 횡단 유동 가스에 분무되는 액체 제트의 가시화를 실험하였다. 실험실의 온도와 습도 등의 환경 조건은 매 실험마다 기록하였고 평균적으로 약 10°C, 1 atm으로 유지되는 가운데 실험이 진행되었다. 횡단 유동 가스의 속도는 전자마노미터와 경사마노미터를 통해 측정되어 보정되었으며 액체제트의 속도는 유량과 가압식 탱크를 이용한 액체의 균일한 가압을 이용하여 실험적으로 구했다. 실험환경 조건의 가스와 액체 제트의 열역학적 물성치는 Table 1에 나타났다.

Table 1. Test environment conditions and properties

	Water	Air
T(°C)	15	10
P(atm)	1	1
ρ (kg/m ³)	998	1.25
μ	1.0×10^{-3}	1.77×10^{-5}
ν (m ² /s)	1.0×10^{-6}	1.41×10^{-5}
σ (N/m)	0.0727	
V(m/s)	2.2~17.26	20~65

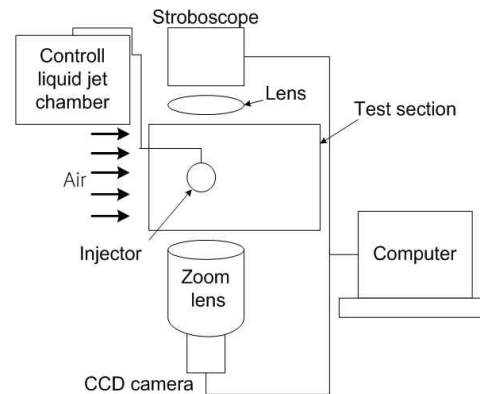


Fig. 1. Schematic of image capturing system

2.2 분무 가시화 실험 방법

Fig. 1은 실험 장치의 구성도이다. 테스트 섹션의 크기는 120 mm(H)×120 mm(W)×350 mm(L)이며 분무형상은 스트로보스코프와 CCD카메라를 이용하여 가시화 하였다. 노즐은 단일구멍을 사용하였으며 압축 공기를 이용하여 가압 조절장치를 통해 균등한 가압을 하였으며 광원의 타이밍과 카메라를 컴퓨터에 연결하여 분무형상을 실시간으로 관찰하였다.

2.3 액적 속도 및 크기 측정 방법

실험에서 데이터를 얻는 측정점의 위치는 분무의 하류 영역까지 측정하기 위하여 분무축 방향으로 인젝터의 아래 부분을 원점으로 하여 Y/D가 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 그리고 140인 위치에서 수행하였으며, 횡단류축 방향으로 노즐의 중심을 원점으로 X/D가 50, 100 그리고 200인 지점에서 분사각에 따라 측정하였다. 측정점은 3차원 이송장치를 사용하여 위치를 변화시켰으며 각 방향에 대해 0.01 mm의 정확도를 가지고 있다. Fig. 2는 위상도플러 효과를 이용하여 액적의 크기와 속도를 측정하는 PDPA의 개략도이다.

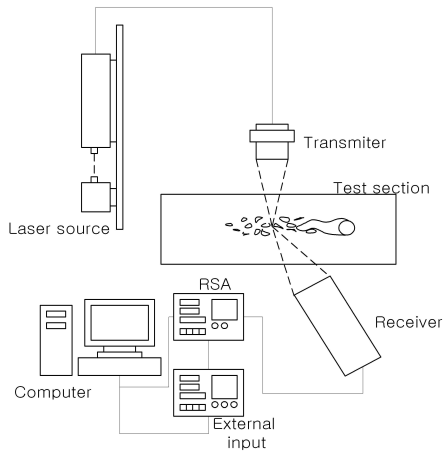


Fig. 2. Schematic of PDPA system

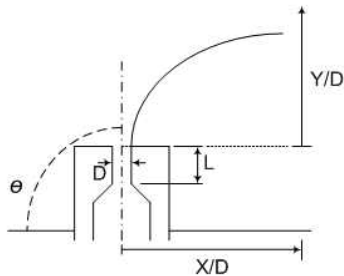
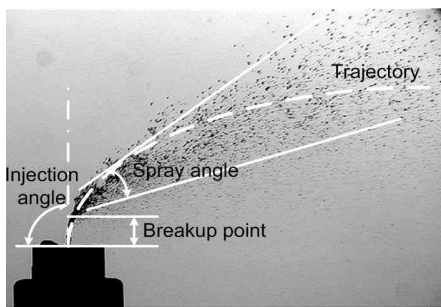


Fig. 3. Parameters of liquid jet in cross flow using Image Express

Fig. 3은 실험 결과해석에 나타난 좌표계와 용어의 개략도를 나타내고 있으며 분무 축방향 원점은 노즐출구이다.

III. 결과 및 고찰

횡단유동 가스 내부에 분사되는 액체 제트의 분무특성을 알아보기 위하여 실험을 통한 해석을 수행하였고 횡단류에 분사된 액체제트의 선단(공기유동방향에서 본 선단)에서는 유체 유동이 지연되고 압력이 상승하며 액체제트 후단의 양단에

서 서로 반대방향으로 회전하는 와류를 형성하며 동시에 횡단류는 액체제트의 주위 가장자리에 전단력을 주어 액체가 찢겨져 나가고, 잘게 부서지는 미립화현상이 일어나게 된다. 액체제트에서 떨어진 작은 덩어리들은 횡단류와 상호작용하여 2차 미립화를 하면서 유동장에 연료를 분포시키게 된다. 모멘텀 비와 웨버 수를 변화하며 액체제트의 분무 형상을 관찰하였고 L/D 변화가 액주 분열에 미치는 현상을 비교 실험하였으며 모멘텀 비와 웨버 수 변화에 따른 액주 분열점도 측정하였다.

횡단 유동장에서 액체 제트에서 액주의 분열을 측정하기 위해 횡단류와의 상호작용의 지표로써 운동에너지와 과장을 이용하여 액체의 표면장력과 동압을 액적 분열에 대한 반응의 함수로 웨버수를 정의하였다. 웨버수는 유동가스의 관성력과 액체제트 마찰력의 비이다. 온도가 변하여 유동가스의 온도가 변함에 따라 웨버수가 변하게 된다. 여기서 ρ 는 밀도 V 는 속도 D 는 노즐 직경을 나타내며 하첨자 a 는 공기이며 l 은 액체를 나타낸다[3-7].

$$We_a = \frac{\rho V_a^2 D}{\sigma_l} \tag{1}$$

또한 횡단류와 액체 제트 사이의 모멘텀 변화를 측정하기 위해서 모멘텀 비를 이용하며 모멘텀 비는 다음과 같이 정의하였다[1-5].

$$q = \frac{\rho_l V_l^2}{\rho_a V_a^2} \tag{2}$$

또한 L/D 변화에 따른 모멘텀 비와 웨버 수 변화와 분무각을 측정하여 실험과 분사각 변화에 대한 액주 분열점 측정을 하였으며 실험 결과의 신뢰성을 위하여 Wu의 경험식과 Wotel의 경험식, Fuller의 경험식을 함께 비교하였다. 다음은 Wu의 경험식과 Wotel의 경험식, Fuller의 경험식이다[3,7,9].

$$Wu \text{ et al} : \frac{Y}{D} = 4.3 \left(q \frac{X}{D} \right)^{0.33} \tag{3}$$

$$Wotel \text{ et al} : \frac{Y}{D} = 1.9 \left(q \frac{X}{D} \right)^{0.45} \tag{4}$$

$$Fuller \text{ et al} :$$

$$\frac{X}{D} = \frac{1}{\pi} \frac{4.4}{q \sin^2 \theta} \left(1 - \frac{V_l \cos \theta}{V_a} \right)^2 \left(\frac{Y}{D} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \left(\frac{Y}{D} \right) \tag{5}$$

3.1 가시화 실험 결과

Fig. 4는 분사각 변화와 횡단류 속도에 의한

(a) $\theta = 70^\circ$ (b) $\theta = 80^\circ$ (c) $\theta = 90^\circ$ (d) $\theta = 100^\circ$ (e) $\theta = 110^\circ$

Fig. 4. Shadowgraph of liquid jet into subsonic cross-flow at different injected angle ($We = 28.52$, $q = 16.54$)

액체 제트의 궤적을 나타낸다. 이미지 결과를 토대로 Image Express를 통하여 수치화하였다. 낮은 분사각에서는 호선을 그리는 모습이 뚜렷했으며 높은 분사각에서는 분열점 이후로 궤적이 변화하는 것을 보여준다. 또한 액체 제트의 침투 길이는 낮은 분사각에서 높으며 높은 분사각에서는 낮다.

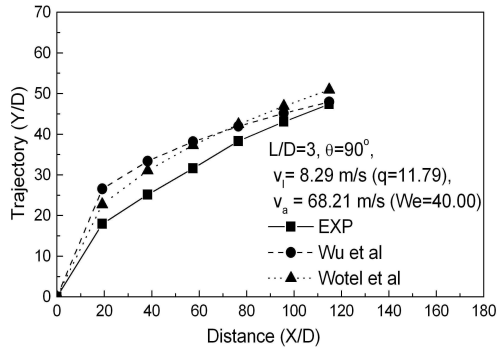
Fig. 5는 가시화 실험 결과와 Wu, Wotel 그리고 Fuller의 실험과 비교한 것이며, 그 비교결과 거의 동일한 모멘텀 비와 웨버수에서 유사한 액체 제트의 분무 궤적을 가지나, 동일한 모멘텀 비의 다른 웨버수에서는 기존의 경험식에서 다루지 않은 웨버수 변화에 의해 액체의 궤적에 큰 차이가 나는 것으로 나타났다. 이는 높은 횡단류의 속도에서 작은 영향을 가지는 웨버수가 낮은 횡단류의 속도에서 동일 모멘텀 비의 다른 웨버수를 가질 때 웨버수의 영향이 크게 발생하는 것을 말하며 모멘텀 비를 이용하여 액체의 궤적을 나타내는 경험식에서 고려하지 않았기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 6은 분사각 변화에 대하여 L/D 변화를 나타내었다. 유체가 흐르는 관의 마찰에 의하여 액체의 교란 차이가 발생하는 것으로 나타났으며 실험 결과 L/D가 3인 경우에 액체의 교란이 크며 액체의 교란으로 인하여 횡단류에 의해 액체가 분열되는 분열점이 낮아졌다. L/D에 의한 액체의 교란은 점차 증가하여 액체의 분열점이 낮아지다가 교란이 최대가 되는 L/D가 3인 지점을 넘어서면 다시 감소한다.

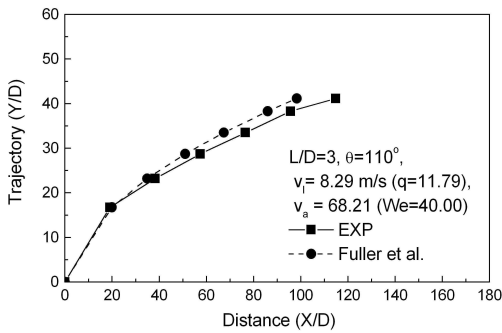
3.2 액적 속도 및 크기 측정 결과

SMD와 액적의 속도는 PDPA와 Image Express의[8] 이미지 기법을 동시에 사용하였으며 마이크로 단위의 이송장치를 이용하고 레이저의 굴절 효과를 최대한 줄여 측정 하였다. 노즐의 하류 영역까지 측정하기 위하여 테스트 섹션 내 노즐의 위치를 벽면에서 떨어지게 하였으며 액적의 유동장 내의 분포를 보기 위하여 인젝터에서 노즐을 제외한 부분을 원점으로 하여 노즐 출구를 기준으로 X/D가 50, 100, 200인 부분에서 측정 하였으며 Y/D가 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 그리고 140 지점에서 측정하였다.

SMD 측정결과 횡단류 속도가 증가하여 액체 제트의 궤적이 휘어지기 때문에 낮은 측정점에서의 액적 크기가 증가하며 높은 측정점에서는 횡단류와의 2차 상호 작용에 의한 액적 크기의 감소가 나타난다. 특히 낮은 분사각에서는 액체 제트의 궤적이 호선을 그리므로 측정점에서의 횡단류 변화에 대한 SMD의 변화가 크게 나타났으며

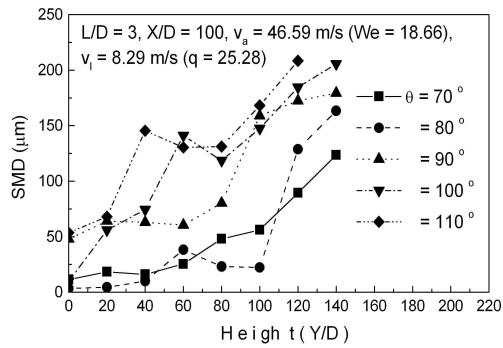


(a) $V_a = 68.21 \text{ m/s}$ ($We = 40.00$)

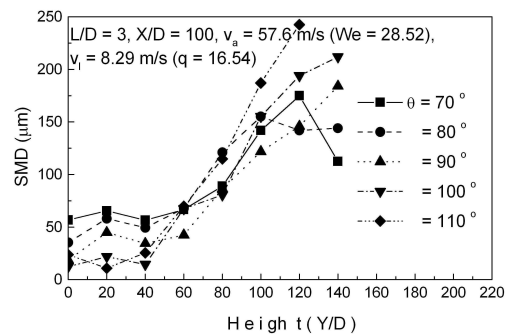


(b) $V_a = 68.21 \text{ m/s}$ ($We = 40.00$)

Fig. 5. Comparison of trajectories with other experimental results



(a) $We = 18.66, q = 25.28$



(b) $We = 28.52, q = 16.54$

Fig. 7. SMD of liquid jet in cross flow with injection angle

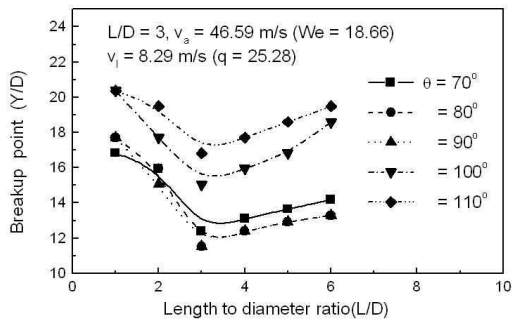


Fig. 6. Breakup point of liquid jet in cross flow with L/D at different injection angles

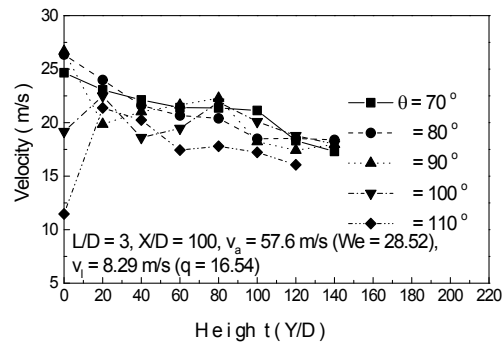
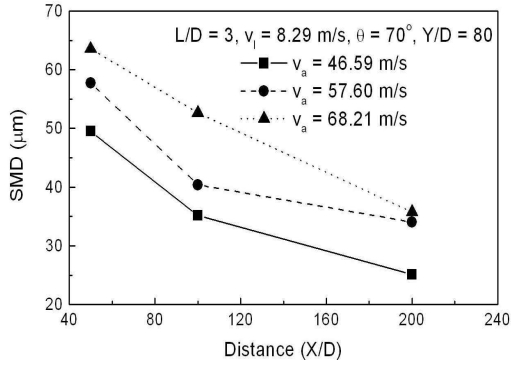


Fig. 8. Axial velocities of droplet in cross flow with injection angle

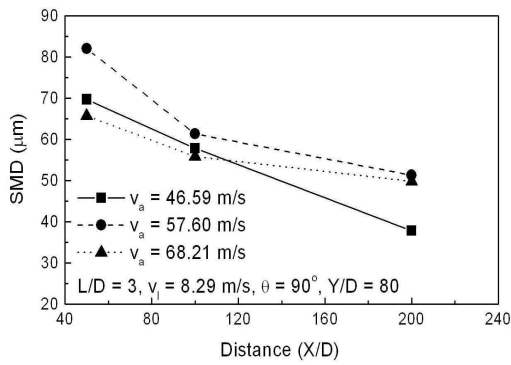
높은 분사각에서는 분무 특성상 측정범위가 넓게 나타나지 않았다.

액적의 속도는 액체 제트의 분무의 중심을 기준으로 높이 방향의 변화가 나타났으며 횡단류 방향으로 액적의 크기가 큰 경우보다 작은 경우에 액적의 질량 감소에 의해 횡단류 속도의 영향이 크게 나타났다.

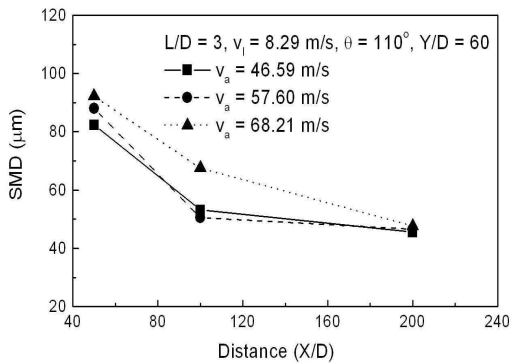
Fig. 6은 분사각에 대하여 $V_a = 46.59\text{m/s}$ 와 $V_a = 59.6\text{m/s}$ 의 SMD 측정 결과이다. 낮은 횡단류 속도(낮은 웨버수)에서는 횡단류 유동장에 SMD가 거의 선형적으로 증가하지만 높은 횡단류 속도(높은 웨버수)에서는 SMD가 작은 부분과 큰 부분으로 영역이 나누어진다. 높이 방향으로 낮은 영역에서 높은 웨버수에서 2차 미립화가 활발



(a) $\theta = 70^\circ$

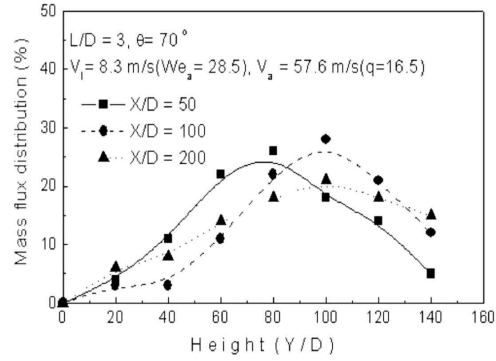


(b) $\theta = 90^\circ$

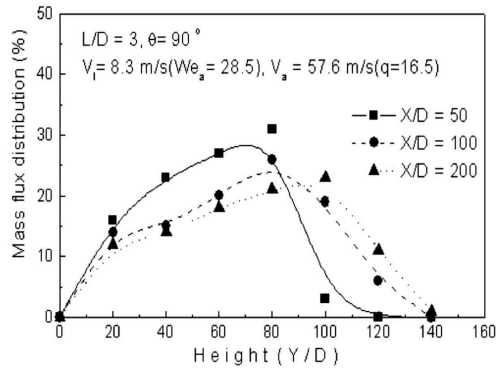


(c) $\theta = 110^\circ$

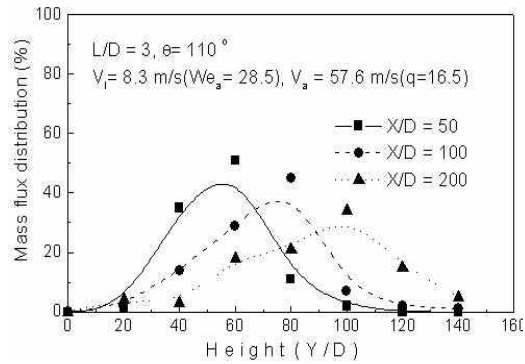
Fig. 9. SMD of liquid jet in cross flow with air velocity at the same height



(a) $\theta = 70^\circ$



(b) $\theta = 90^\circ$



(c) $\theta = 110^\circ$

Fig. 10. Mass flux distribution of droplet of liquid jet in cross flow at the same air velocity

히 일어나는 것을 나타낸다.

분사각에 대한 SMD의 측정 결과에서 보면 Fig. 7에서처럼 횡단류의 속도가 증가할수록(웨버 수가 증가할수록) 액적의 크기가 작아지는 것을 알 수 있으며 X/D가 작을 때 액주의 형상 때문에 오히려 횡단류 속도가 클 때 보다 작을 때 액적의 크기가 작은 것으로 나타난다. 횡단류의 속

도가 커지면서 액체 제트의 궤적이 휘어지며 낮은 측정점에서 커지지만 높은 측정점에서는 낮은 측정점에서보다 액적의 크기가 줄어드는 경향을 보인다. 또한 2차 상호 작용으로 인하여 X/D가 증가할수록 액적의 분포는 점차 선형성을 갖고 액적의 크기도 노즐에서 멀어질수록 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서와 같이 횡단류 방향에 수직인 높이 방향으로의 액적의 속도를 나타낸다. 높이 방향으로의 액적의 크기가 증가함에 따라 횡단류 방향의 속도가 낮은 부분의 작은 액적보다 낮은 속도를 갖는다. 또한 높이 방향으로의 속도는 Y/D가 높은 영역에서 액적의 크기와 액체 제트의 모멘텀에 의해 낮은 영역의 작은 액적 보다 높이 방향으로의 절대 속도가 크다.

L/D의 변화를 살펴보면 Fig. 9에서 유체가 흐르는 관의 마찰에 의하여 액주의 교란 정도의 차이가 발생하는 것을 나타내며 실험 결과 L/D가 3인 경우에 액주의 교란이 크며 액주의 교란으로 인하여 횡단류에 의해 액주가 분열되는 분열점이 낮아지는 결과로 나타났다. 이것은 유체가 흐르는 관에서 관 길이에 따라 층류가 관마찰로 인하여 난류로 바뀌어 난류의 강도가 증가하다가 다시 관의 마찰로 인하여 난류의 강도가 감소하여 액주의 교란이 증가하다 감소하는 것으로 나타나는 것으로 분석된다.

Fig. 10은 거리에 따라 횡단류 속도에 대한 액적 밀도 분포를 나타내었다. 액적의 밀도 분포는 분사각이 높을 때 밀집되는 경향이 뚜렷했으며 횡단류 속도에 의하여 밀집도가 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 거리가 멀어지면 액적의 밀도 분포는 점차 완만해지며 어느 부분에서 액적이 밀집되는 경향이 줄어들었다. 또한 높이에 대하여 액적의 밀도 분포는 Fig. 10 (a)에서처럼 횡단류의 속도에 대하여 낮은 부분의 액적 밀도 분포가 증가하였으며 분사각에 대하여 액적의 밀도 분포는 낮은 각에서 높다가 분사각이 증가할수록 점차 낮아졌으며 거리가 멀어지면 분사각에 대한 영향이 줄어드는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 9와 Fig. 10에서처럼 낮은 분사각과 높은 분사각에서의 특성을 알 수 있으며 미립화의 결과와 액적 밀도 분포를 통해 연소 특성과 분무 특성을 고려하여 이음속 횡단 기체에서 분사할 때의 여러 환경 조건을 고려하여 필요한 분사각을 선정할 수 있다고 생각한다. 특히 낮은 분사각에서 횡단기체의 속도(웨버수)에 의한 영향이 크기 때문에 분무 궤적을 쉽게 예측할 수 없지만 액적의 밀도 분포와 미립화의 특성이 좋고 분사각이 높은 경우에는 분무 궤적의 예측은 쉽지만 액적의 밀도 분포와 미립화가 횡단 기체의 속도의 영향을 많이 받기 때문에 작동 환경에서의 적절한 선정이 필요하다.

IV. 결 론

횡단 기체 유동장에 일정한 각도를 가지고 분

사되는 액체제트의 분무특성을 가시화 실험과 액적 속도 및 크기 측정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액체 제트의 궤적은 낮은 분사각에서 웨버수(횡단류 속도)에 의한 영향이 크고, 높은 분사각에서 L/D에 의한 분열점 변화에 의한 영향이 크게 나타났다. 횡단류 속도가 낮을수록 기체의 모멘텀이 액체의 표면장력보다 작기 때문에 액주 분열이 늦어지게 되어 모멘텀 비가 크고 웨버수가 작은 경우 웨버수에 의한 영향을 고려해야 정확한 액체제트 궤적의 예측이 가능하다.
2. 액주의 분열과 유동장에서의 미립화는 낮은 분사각이 높은 분사각보다 잘 이루어지며 L/D가 3일 때 에 노즐 형상에 의하여 액체제트가 노즐 출구에서 최대 교란이 일어나며 액주의 교란이 증가할수록 분열점의 거리가 낮아진다.
3. 횡단류의 영향에 의해 액체제트의 궤적이 횡단류 방향으로 휘어지며, 이 때 액적의 크기(SMD)는 높이 방향으로 증가하며 낮은 웨버수에서는 선형적인 분포를 이루지만 높은 웨버수에서는 액적의 크기가 작은 영역과 큰 영역으로 나누어진다. 또한 노즐에서 멀어질수록 횡단류와의 상호작용으로 인하여 액적의 크기는 감소하고 낮은 분사각에서 횡단류 유동장에 넓게 분포하며 높은 분사각에서는 좁게 분포한다.

후 기

본 연구는 2005년도 한국항공대학교 교비 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Seay, J., McDnell, V., and Samuelsen, G., "Atomization and Dispersion from a Radial Airblast Injector in a Subsonic Crossflow", AIAA paper 95-3001, July 1995.
- 2) Kihm, K. D., Lyn, G. M., and Son, S. Y., "Atomization of Cross-Injecting Sprays into Convective Air Stream, Atomization and Sprays", Vol. 5, No. 4, pp. 417-433, 1995.
- 3) Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Nejad, A. S., "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Cross-flows", Journal of Propulsion and power, Vol. 13, No. 1, pp. 64-73, 1997.

4) Oda, T., Hiroyasu, H., Arai, M., and Nishida, K., "Characterization of Liquid Jet Atomization Across a High-Speed Air Stream", JSME International Journal, Series B, Vol. 37, No. 4, pp. 937-944, 1994.

5) Inamura, T., and Nagai, N., "Spray Characteristics of Liquid Jet Traversing Subsonic Air stream", Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 6, pp. 798-803, 1994.

6) Nguyen, T. T., and Karagozian, A. R., "Liquid Fuel Jet in Subsonic Cross-flow", Journal of Propulsion and Power, Vol. 8, No. 8, pp. 21-29, 1992.

7) Wotel, G. J., Gallagher, K. E., Caron, S. D., Rosfjord, T. J., Hautman, D. J., and Spadaccini, L.J., "High Speed Turboramjet Combustor Technology Program", Wright Lab., TR-91-2043, Wright Patterson AFB, OH, 1991.

8) Media Cybernetics corporation. "The Imaging Experts Technical manual", 1999.

9) Fuller, R. P., Wu, P. K., Kirkendall, K. A., and Najad, A. S., "Effects of injection Angle on Column Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Cross-flows", AIAA paper 97-2966, July 1997.