

저속 횡단유동장에 분사된 액체제트의 분무궤적 및 분열점에 대한 상관관계식

김종현[†] · 이봉수* · 구자예**

Correlations of Trajectory and Break-up Point for Liquid Jet Injected into Low Speed Cross-flow

Jong-hyun Kim, Bong-soo Lee and Ja-ye Koo

Key Words: Liquid jet(액체제트), Cross-flow(횡단유동), Experimental correlation(실험관계식), Highest penetration trajectory(분무선단 외곽표면 궤적), Momentum ratio(모멘텀비)

Abstract

The correlations for cross-flow have not been well established, because of the complexity of breakup and atomization mechanism. A study was performed to investigate the characteristics of spray behaviour of liquid jet in the bag breakup regime injected into low-speed cross-flow with the pressure single-hole nozzle. The shadow-graphy method was used for the cross-flow jet visualization. The experimental variables of liquid jet were nozzle diameter (0.3 mm~1.0 mm), injection pressure (50 kPa~150 kPa), and the velocity of cross-flow (27 m/s~42 m/s). The highest penetration trajectories of liquid jet are governed by the momentum ratio ($\rho_l U_l^2 / \rho_a U_{cross}^2$) rather than the Weber number and the new empirical equations of the highest penetration trajectory and breakup point at low-speed corss-flow are established.

기호설명

\dot{m} : 질량유량
 U : 속도
 d : 직경
 μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 σ : 표면장력
 q_1 : 모멘텀비

하첨자

l : 분사액체
 a : 횡단유동 공기
 $cross$: 횡단유동

1. 서론

가스터빈 및 로켓엔진은 연소기 내부에서 연속적인 연소를 통하여 높은 추력을 얻으므로, 추진 성능 및 배출가스는 안정된 연료의 공급, 연료의 미립화, 그리고 연소와 밀접한 관련이 있다. 유해 배출가스 저감 및 연소효율을 높이기 위하여 연소시스템에 대한 연구가 실험적인 방법과 수치해석적인 방법을 이용하여 수행되어 왔으며, 전산유체역학의 발전으로 복잡한 난류유동을

(2008년 5월 28일 접수 ~ 2008년 6월 12일 심사완료)

*한국기유화시험연구원 유체기계평가팀

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

[†]책임저자, 회원, 동양공업전문대학 기계설계과

E-mail : jhkim0@dongyang.ac.kr

TEL : (02)2610-5230 FAX : (02)2610-1852

예측할 수 있어서 실험 횟수를 감소시킬 수 있었지만, 경계조건에 대한 자료가 부족하여 추가적인 연구 및 실험이 진행되고 있다.

횡단 유동장에 분사되는 액체제트에 대하여 많은 모델식들이 제안되었지만, 지배변수가 다양하여 추가적인 액체제트의 분무거동 특성에 대한 모델식 정립이 필요하다.

Wu⁽¹⁾는 아음속 횡단 유동장으로 분사되는 액체 제트의 분열과정을 실험적으로 연구하여 유체의 물성치, 분사속도, 노즐의 직경, 유동장의 마하수에 대한 액체제트 분무계적 모델식을 제안하였다.

Inamura⁽²⁾는 횡단 유동장에 분사되는 액체제트에 대한 사진 및 고속 비디오 촬영을 통하여 액체의 질량유속, 평균입경, 속도를 측정하여 유동장의 속도와 분무액체의 분포관계를 연구하였다.

Fuller⁽³⁾는 아음속 횡단 유동장에 분사되는 액체제트의 분사각을 변화시키면서 액체제트의 분열과정을 웨도우그래프 방법으로 가시화하여, 분사각 변화에 따른 분무의 궤적, 침투거리, 분열점의 변화가 모멘텀비와 항력계수와 관계가 있음을 연구하였다.

본 연구에서는 기존의 횡단유동장의 속도(70 m/s 이상) 보다 상대적으로 저속(50 m/s 이하)인 횡단유동장에 분사되는 백(bag)분열 영역의 액체제트에 대한 실험을 수행하여, 액체제트의 분무선단 외곽표면 궤적 및 분열점의 관계식을 구하여 기존의 연구결과를 저속 횡단유동장에 대한 결과와 검증하고 횡단류 제트의 분무거동의 상관관계를 연구하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

충류 횡단 유동장을 만들기 위하여 회전수 조절이 용이한 5.5 kW 직류모터 축류팬을 장착한 흡입식 풍동을 사용하였다.

Figure 1은 액체제트에 대한 유동가시화 실험장치의 구성도를 나타낸다. 테스트 섹션의 크기는 120 mm(H)×120 mm(W)×350 mm(L)이며 분무형상은 스트로보스코프, 볼록렌즈, CCD 카메라를 이용하여 가시화하였다. 압축공기 및 압력조절기를 이용하여 균일한 분사압력을 만들었으며, 스트로보스코프와 카메라를 동기화하여 분무형상을 실시간으로 촬영하였다.

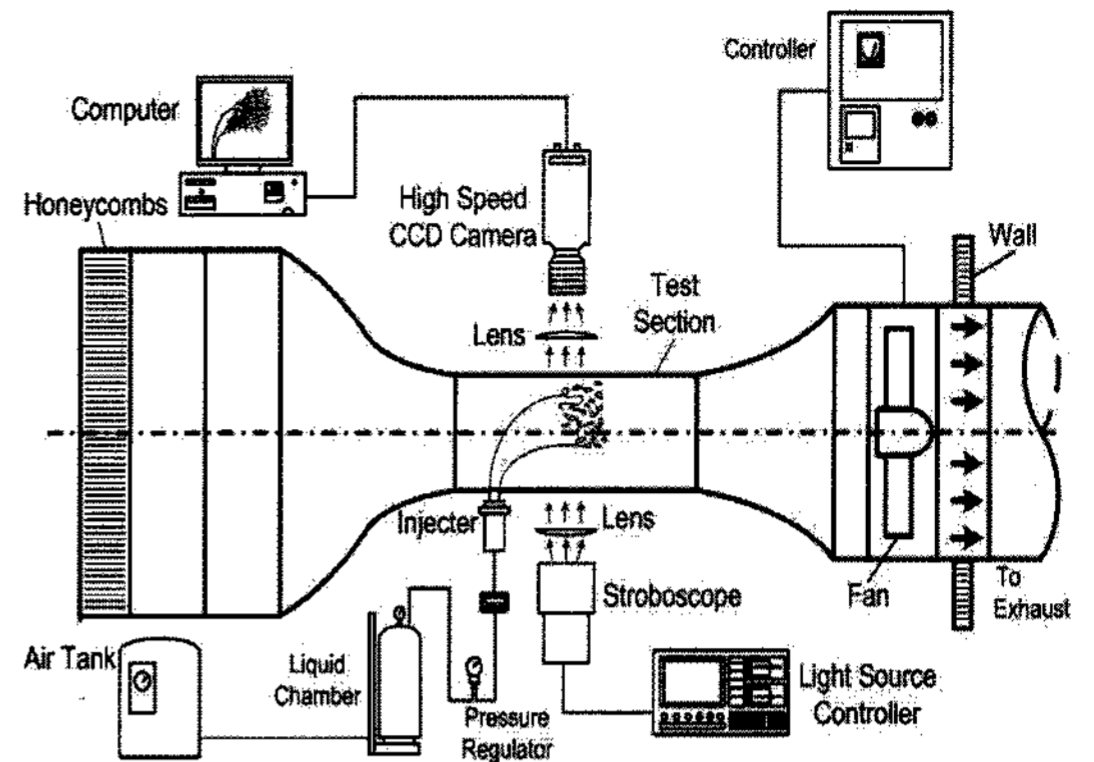


Fig. 1 Schematic of visualization system

Table 1 Specifications of single-hole nozzle

| Item | Specification | | | |
|------------|---------------|-----|-----|-----|
| d_o (mm) | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 1.0 |
| L/d_o | 3 | | | |

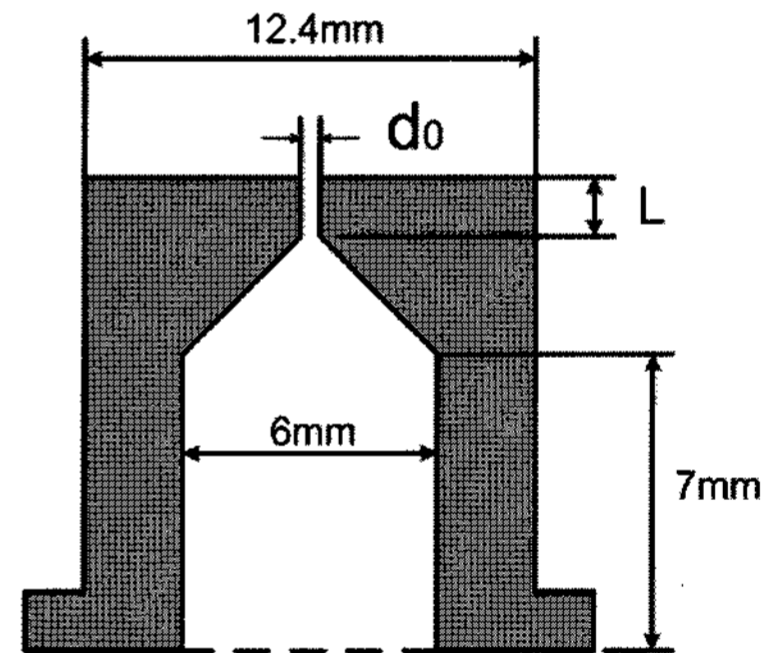


Fig. 2 Schematic of single-hole nozzle

2.2 실험조건 및 방법

실험에 사용한 노즐의 종류는 Table 1과 같으며, 노즐에 대한 제원은 Fig. 2와 같다. 실험환경은 Table 2에 나타내었고, 사용된 변수의 범위는 Table 3과 같다.

노즐의 L/d_o 를 3으로 유지하면서 노즐직경 d_o 를 0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm, 1.0 mm로 변경하였으며, 횡단 유동장의 속도를 27 m/s, 33 m/s, 39 m/s, 42 m/s로 변화시키며 유동 가시화를 수행하였다.

유동 가시화 결과를 Fig. 3과 같이 분열점(Break-up Point), 분무선단 외곽표면 궤적(Spray Trajectory)으로 정의하였고, 각 실험조건에 대해 100장의 가시화 영상을 획득하여, 정의된 값으로 측정 후 산술평균하였다.

Table 2 Test environment conditions

| Item | Liquid | Ambient air |
|------------------------------|--------------|------------------------|
| Temperature(°C) | 20 | 20 |
| Barometric Pressure (kPa) | - | 101.3 |
| Supply Pressure (kPa) | 50, 100, 150 | - |
| Density (kg/m ³) | 998 | 1.2 |
| Viscosity(Pa·s) | 0.001 | 1.818×10 ⁻⁵ |
| Surface Tension(N/m) | 0.0727 | - |

Table 3 Experiment conditions for liquid jet

| Parameter | Range |
|---|-------------|
| Fuel Flow-rate (g/s) [water] | 6.05~7.35 |
| Cross-flow Velocity [U _{cross} (m/s)] | 27~42 |
| $Re_1 = \frac{\rho_1 U_1 d_o}{\mu_1} \times 10^3$ | 1.86~12.98 |
| $Re_{cross} = \frac{\rho_a U_a d_h}{\mu_a} \times 10^5$ | 2.14~3.33 |
| Cross-flow Hydraulic Diameter [d _h (mm)] | 120 |
| $We_a = \frac{\rho_a U_{cross}^2 d_o}{\sigma_1}$ | 3.61~29.12 |
| Liquid Jet Momentum Ratio [q ₁] | 43.94~79.72 |

영상분석은 Image-Pro Express 소프트웨어를 이용하여 측정하였다.⁽⁴⁾

액주의 분열점은 액주의 지름이 노즐직경의 1.5배가 되는 지점을 분열점으로 정의하였고, 분무선단 외곽표면의 궤적은 분열점을 기준으로 액적의 밀도가 70% 이상되는 외곽표면의 궤적을 연결하여 측정하였다.

2.3 무차원 변수

Recross은 횡단 유동장의 레이놀즈수를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$Re_{cross} = \frac{\rho_a U_{cross} d_h}{\mu_a} \quad (1)$$

횡단 유동장과 액체제트 사이의 모멘텀 변화를 측정하기 위해서 모멘텀비를 다음과 같이 정의하였다.⁽¹⁾

$$q_1 = \frac{\rho_1 U_1^2}{\rho_a U_{cross}^2} \quad (2)$$

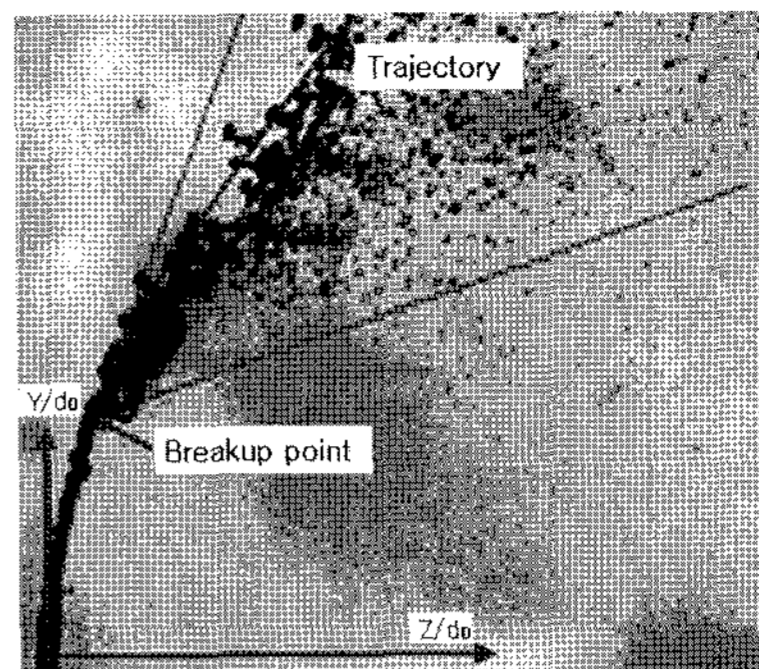


Fig. 3 Definition for the phenomenological analysis

액체의 표면장력과 횡단 유동장의 공기역학적 힘은 액체분열의 주요인자이며, 두 힘의 관계를 웨버수로 표현한다. 웨버수는 횡단 유동장의 동압과 액체제트 표면장력의 비로 정의한다.^(2, 8)

$$We_a = \frac{\rho_a U_{cross}^2 d_o}{\sigma_1} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

노즐의 분사압력, 횡단 유동장의 속도, 노즐의 직경 변화에 따른 분무계적의 변화를 관찰하였으며, Fig. 4와 같이 횡단 유동장에 액체제트가 수직으로 분사되면 액체제트는 횡단 유동장 방향으로 분열이 진행되는 것을 알 수 있다.

3.1 액체제트 분사압력 변화에 따른 분무선단 외곽 표면 궤적

Figure 4 및 Fig. 5는 일정한 속도의 횡단 유동장에 대해 액체제트의 분사압을 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa로 변화시킬 경우의 유동가시화 및 분무선단 외곽표면 궤적의 변화를 나타낸 결과이다. 분사압의 변화는 모멘텀비(q₁)의 변화로 표현된다. 횡단 유동장의 유속과 노즐의 직경이 동일할 경우 노즐의 분사압력 증가에 의하여 모

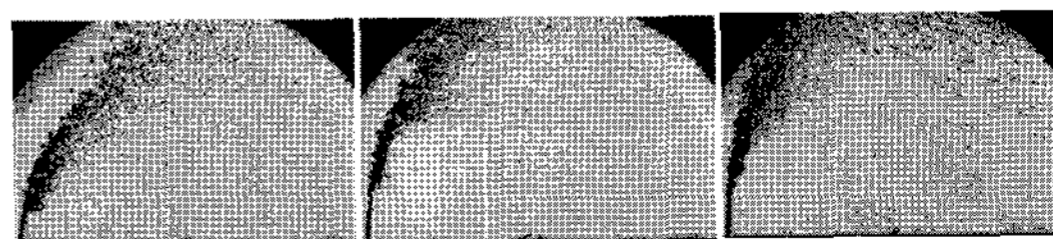


Fig. 4 Spray images of liquid jet in cross-flow (Re_{cross}=2.14×10⁵, d_o=1.0 mm, We_a=12.03)

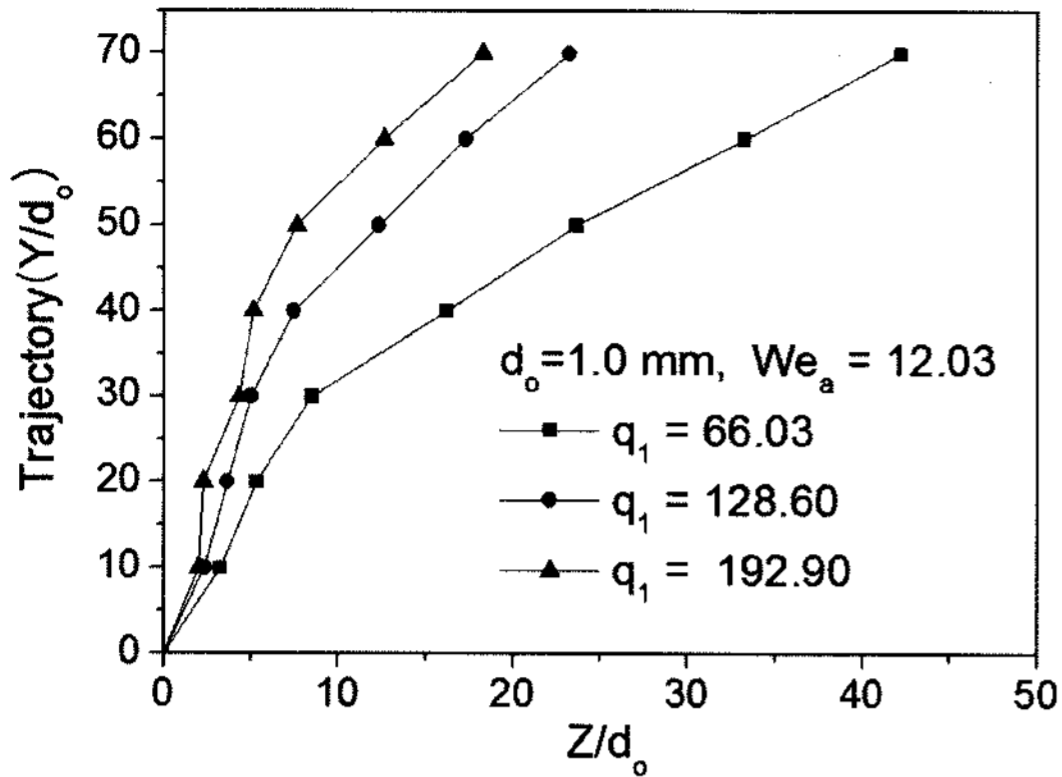


Fig. 5 Trajectories of liquid jet in cross-flow at $Re_{cross} = 2.14 \times 10^5$

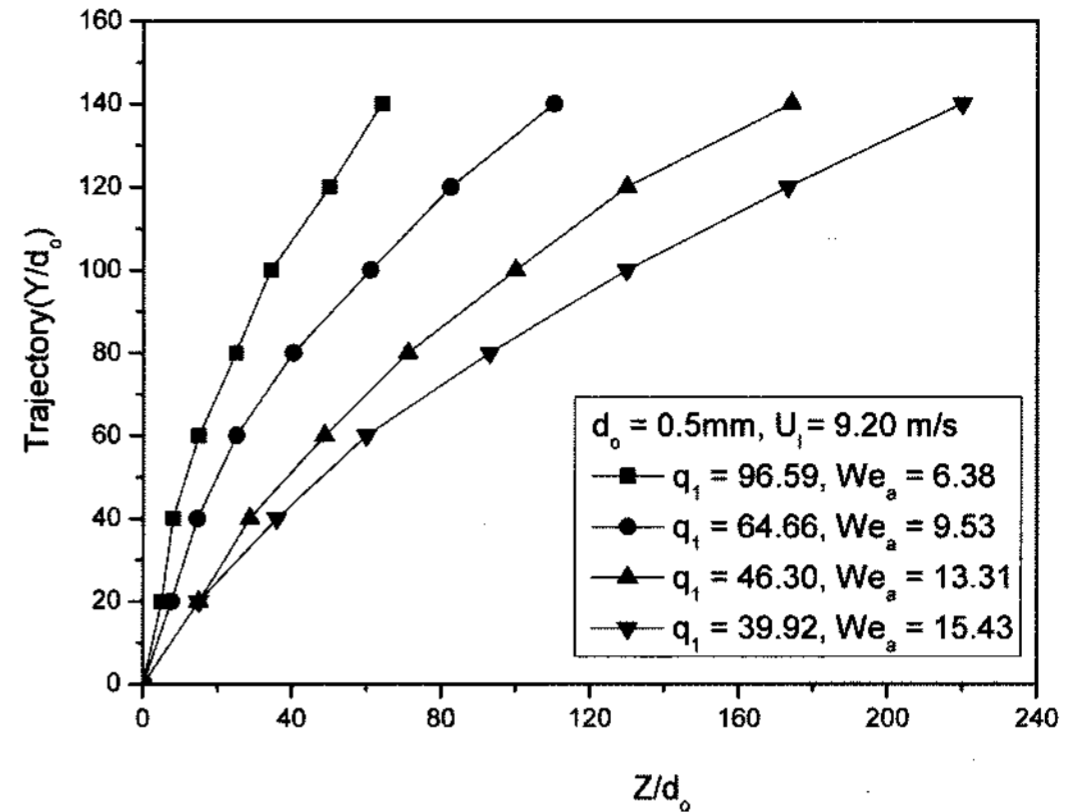
멘텀비가 증가할수록 액체제트의 후단에서 분열이 활발해지는 것을 볼 수 있는데, 이는 분사되는 액체의 속도 증가에 의한 질량유량이 증가하였기 때문이다. 또한 액체제트 액주의 분열점(Y/d_0), 침투길이 및 분무선단 외곽궤적의 기울기가 모멘텀비의 증가에 따라 증가함을 알 수 있는데, 이는 분사되는 액체의 모멘텀이 증가하였기 때문이다.

3.2 횡단유동장의 속도 변화에 따른 분무선단 외곽 표면 궤적

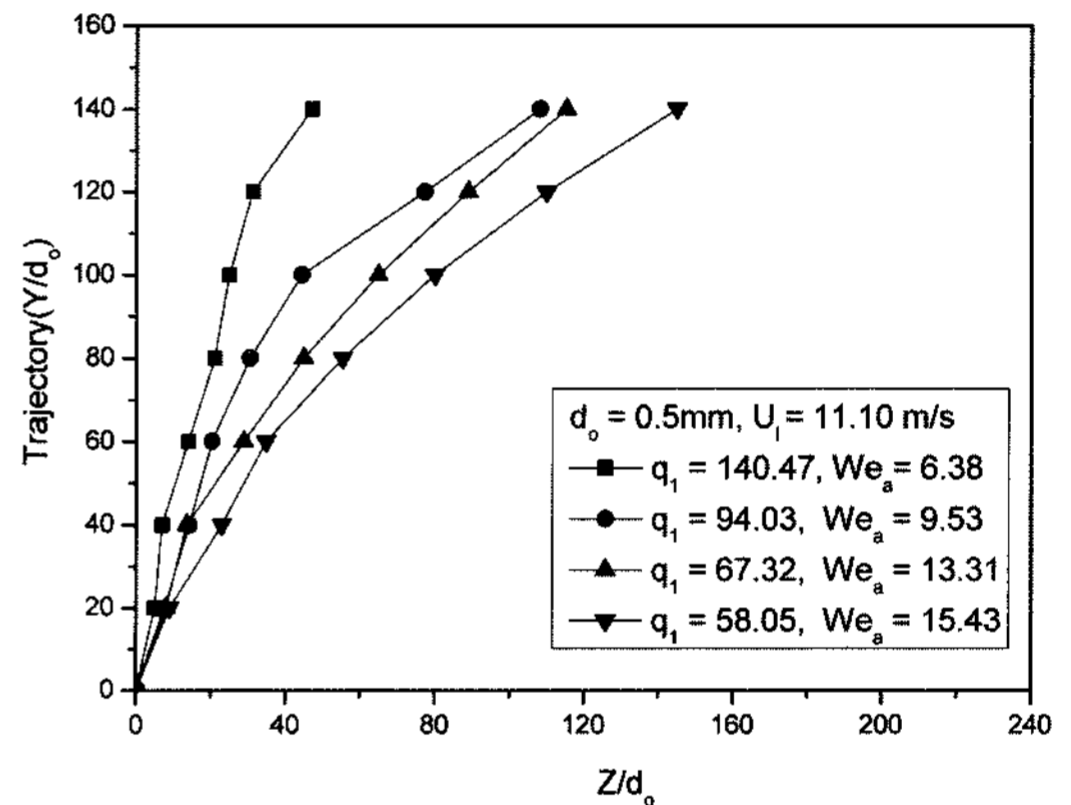
Figure 6은 노즐직경이 0.5 mm인 단공노즐에서 분사되는 액체제트 분사압을 100 kPa($U_1=9.20$ m/s) 및 150 kPa($U_1=11.10$ m/s)로 유지하고 횡단 유동장의 속도를 27 m/s, 33 m/s, 39 m/s, 42 m/s로 변경하여, 모멘텀비가 변화한 경우의 분무선단 외곽궤적 궤적을 나타낸 것이다. 횡단 유동장의 속도를 증가시키면 모멘텀비가 감소하게 되고, 모멘텀비 감소에 따라 액체제트의 분무선단 외곽궤적 궤적의 기울기와 침투길이가 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 액체제트 분무선단 외곽궤적 궤적과 침투길이는 웨버수와 모멘텀비에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

3.3 노즐직경 변화에 따른 분무선단 외곽궤적 궤적

Figure 7은 횡단유동장의 속도를 39 m/s 및 42 m/s로 고정시키고, 노즐에서의 분사압력을 100 kPa과 150 kPa로 일정하게 유지하면서 노즐의 직경을 0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm, 1.0 mm로 변경한 경우에 대해 액체제트의 분무선단 외곽궤적 궤적을 나타낸 것이다. 모멘텀비가 일정할 경우 노즐의 직경 변화에 의해 웨버수가 변



(a) $U_1 = 9.20$ m/s, $d_0 = 0.5$ mm



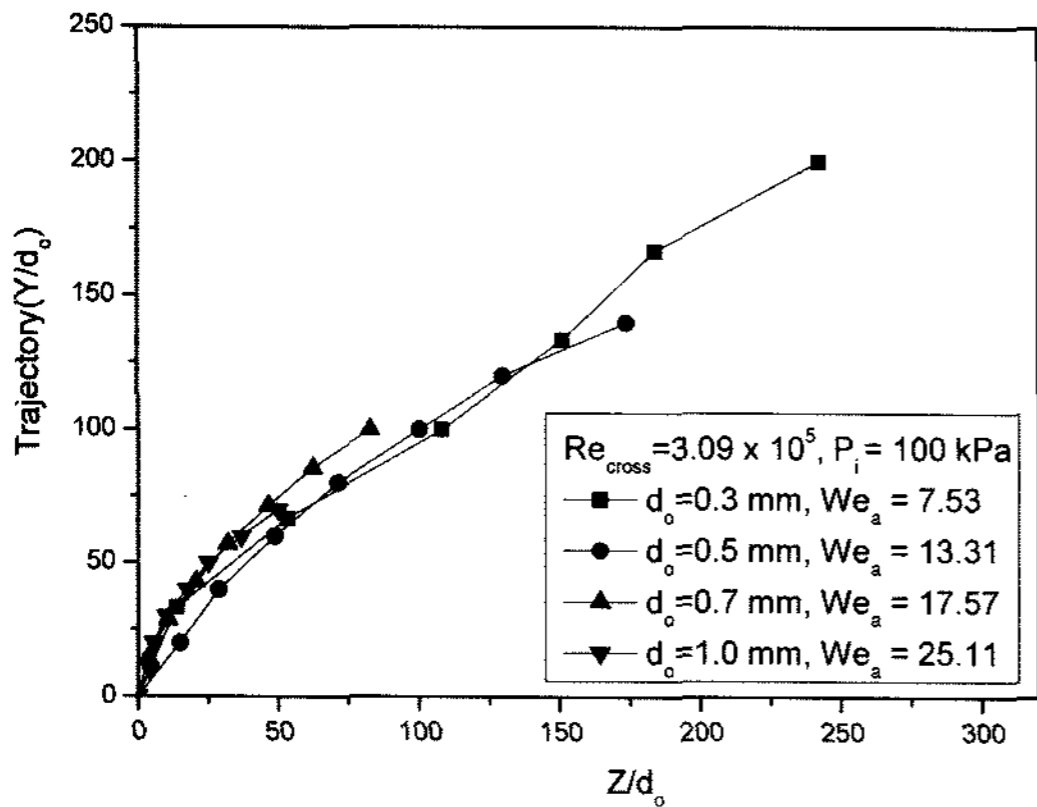
(b) $U_1 = 11.10$ m/s, $d_0 = 0.5$ mm

Fig. 6 Trajectories of liquid jet in cross-flow at various Re_{cross}

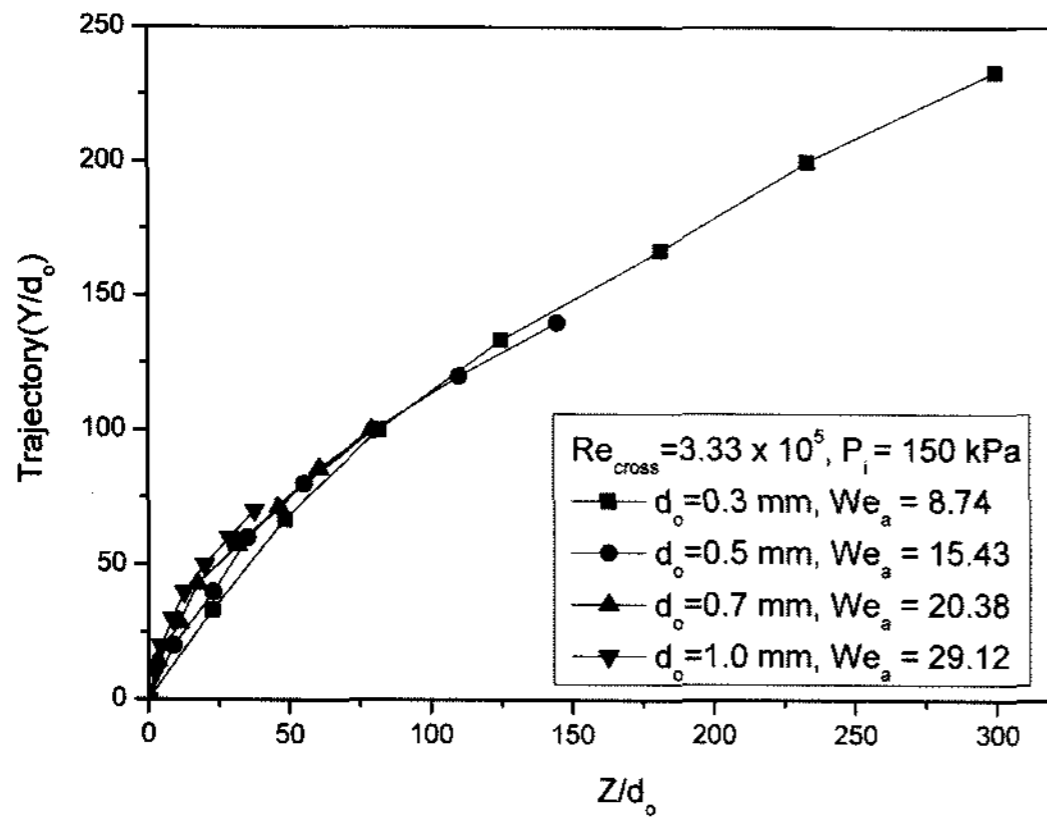
화하더라도 액체제트 분무선단 외곽궤적의 궤적은 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 3.2항의 결과와 동시에 고려하면, 분무선단 외곽궤적의 궤적은 주로 모멘텀비의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

3.4 분무선단 외곽궤적 궤적의 경험식

실험에서 얻은 결과로부터 액체제트 분무선단 외곽궤적 궤적은 웨버수가 주요 변수가 아닌 것을 확인할 수 있다. 횡단유동장에 분사된 액체제트의 궤적 및 침투길이에 대한 실험적 연구는 Wu⁽²⁾, Fuller⁽³⁾, Yates⁽⁵⁾, Geery⁽⁶⁾, Wotel⁽⁷⁾ 등에 의하여 수행되었었고 액주의 궤적 경험식을 제시한 바 있다. Wu⁽²⁾는 횡단유동장에 수직 방향으로 분사된 액체제트와 횡단유동장의 공기력 사이의 상호작용을 연구하였으며, 횡단 방향 분열점 Z/d_0 는 분사과정에서 넓은 범위에 걸쳐 일정한 값을 지닌다는 것을 밝혔다.⁽²⁾ Fuller⁽³⁾는 Wu⁽²⁾에 의해 연구된 모멘텀비



(a) $Re_{cross} = 3.09 \times 10^5$, $P_i = 100 \text{ kPa}$



(b) $Re_{cross} = 3.33 \times 10^5$, $P_i = 150 \text{ kPa}$

Fig. 7 Trajectories of liquid jet in cross-flow at various diameter of nozzle

분석을 확장시켜 연구하였으며, 분사각도에 따른 액주의 궤적 및 분열점을 Wu와 같은 방식으로 연구하였다. Wu⁽²⁾에 의해 연구된 분무선단 외곽표면 궤적 경험식 및 액주의 수직방향 분열점 경험식은 다음의 식(4)와 식(5)와 같다.

$$\frac{Y}{d_o} = 4.3q_1^{0.33} \left(\frac{Z}{d_o}\right)^{0.33} \quad (4)$$

$$\frac{Y}{d_o} = 3.44\sqrt{q_1} \quad (5)$$

노즐의 직경, 분사압력, 횡단유동장의 속도 변화에 따른 분무 궤적의 가시화 결과와 Wu⁽²⁾의 액체제트 분무선단 외곽표면 궤적에 대한 관계식을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 본 실험에서 얻은 결과와 비교하면, Wu⁽²⁾의 수식과는 정확하게 일치하지 않는 경향을 보이는데, 그 원인은 노즐의 제원이 상이(Wu의 연구에 사용된 노즐의 $L/d_o=4$)하고, 횡단 유동장의 속도범위가 현저히 틀

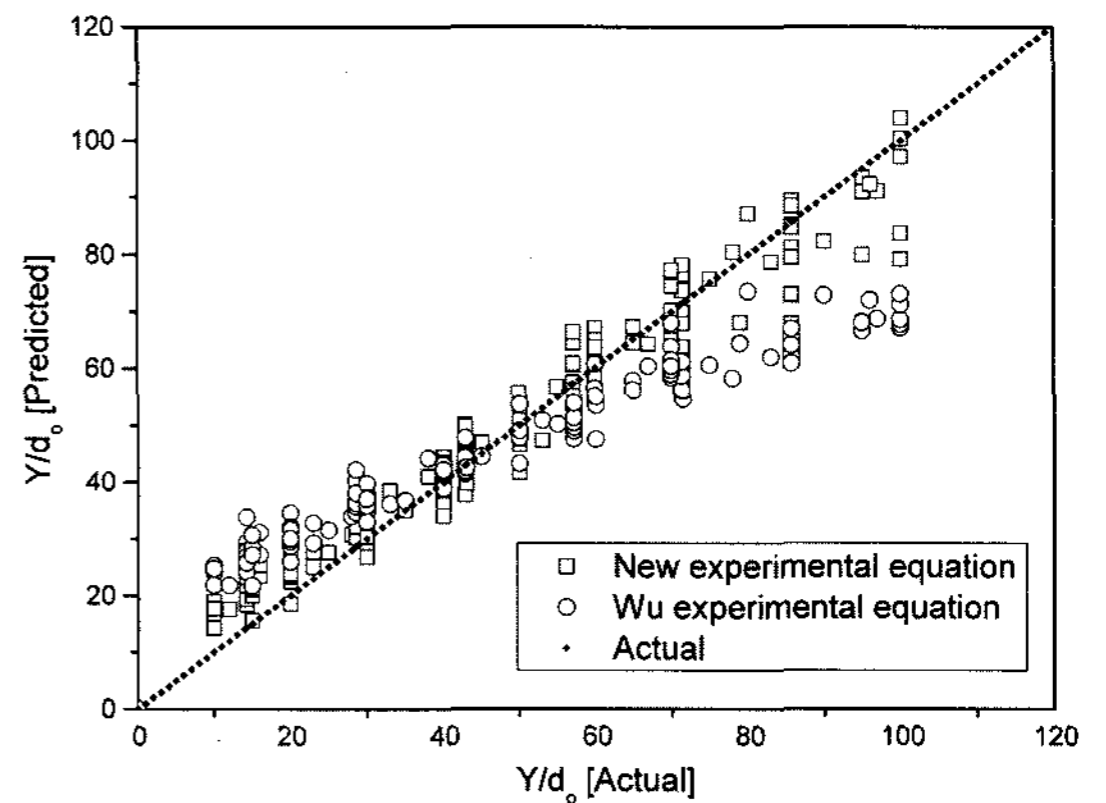
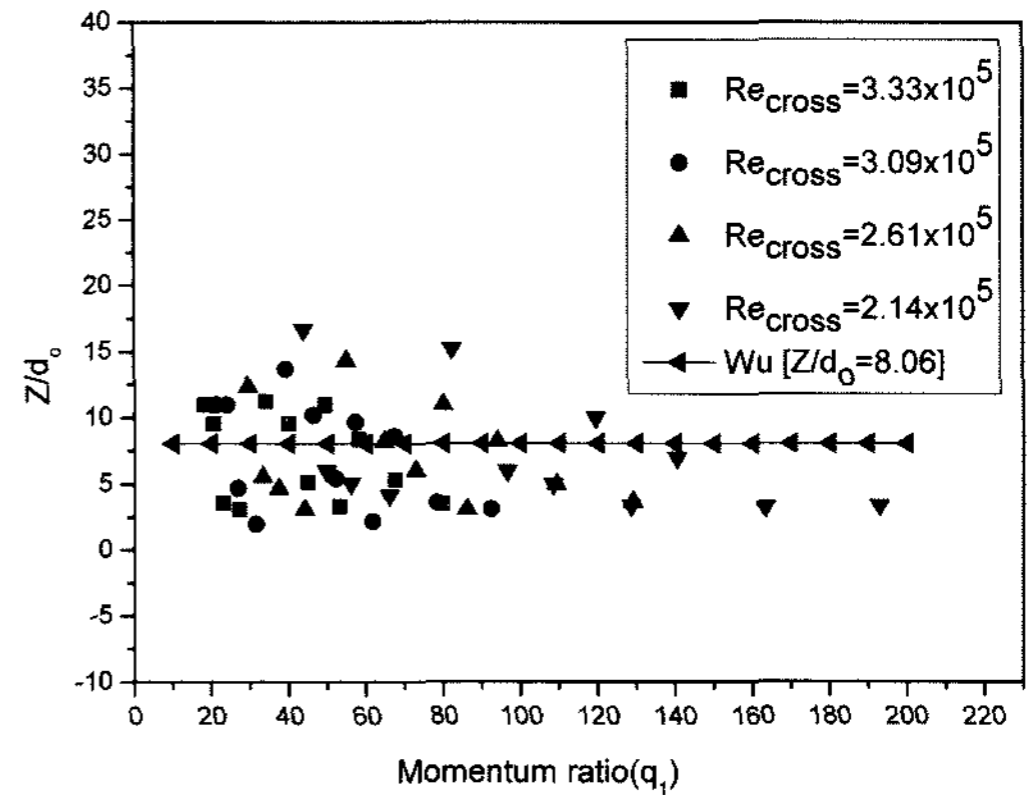
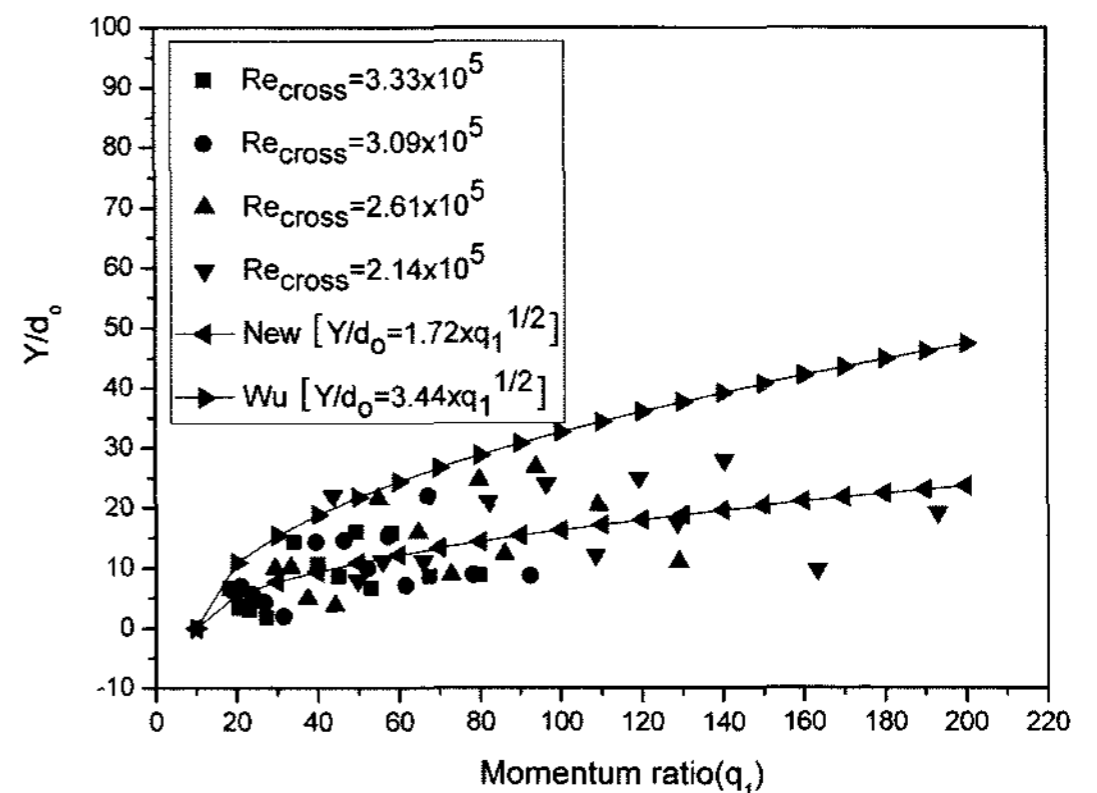


Fig. 8 Comparison of the trajectories with Wu empirical Eq.



(a) Z-direction



(b) Y-direction

Fig. 9 Column fracture distance of liquid jets in cross-flow

리기 때문이라고 판단된다. Wu⁽²⁾의 횡단 유동장의 속도 범위는 70 m/s~141 m/s였으며, 본 실험의 횡단유동장 속도 범위는 27 m/s~42 m/s였다. 상대적으로 고속의 횡단유

동장에 분사되는 액체제트는 모멘텀비의 증가에 의해 액주의 미립화가 가속되어 분무선단 외곽표면 궤적의 기울기를 감소시키는 것으로 판단된다. 실험결과를 바탕으로, 저속 횡단유동장에 분사되는 액체제트의 분무선단 외곽표면 궤적에 대해 다음과 같은 새로운 경험식을 도출할 수 있다.

$$\frac{Y}{d_o} = 2.6q_1^{0.33} \left(\frac{Z}{d_o}\right)^{0.49} \quad (6)$$

Figure 9는 액체제트의 분열점을 측정된 결과다. Fig. 9(a)는 모멘텀비 변화에 따른 Z/d_o 를 나타낸 것으로, 모멘텀비가 증가하여도 액체제트 액주의 수평방향 분열점은 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Wu⁽²⁾의 실험결과와 상당히 일치함을 확인할 수 있었다. Fig. 9(b)는 모멘텀비 변화에 따른 Y/d_o 를 나타낸 것으로 Wu⁽²⁾의 실험결과와 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 본 실험의 결과로부터 저속 횡단유동장에 분사되는 액체제트에 대한 수직방향 분열점 관계식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{Y}{d_o} = 1.72\sqrt{q_1} \quad (7)$$

4. 결 론

압력분무형 단공노즐에서 저속 횡단유동장으로 분사되는 액체제트의 분무선단 외곽표면 궤적 및 분열점 변화를 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 있었다.

1) 액체 제트의 분사압력을 증가시키면 액체의 모멘텀이 증가하게 되어 액체제트의 침투길이 및 액체제트 분무선단 외곽표면 궤적의 기울기를 증가시키며, 횡단유동장의 유속 증가는 상대적으로 액체의 모멘텀이 감소하게 되어 침투길이 및 액체제트 분무선단 외곽표면 궤적의 기울기를 감소시킨다. 따라서 액체제트의 분무거동 특성인 침투길이 및 액체제트 분무선단 외곽표면 궤적의 기울기는 웨버수 보다 모멘텀비가 주요한 변수로 작용한다.

2) 모멘텀비가 일정할 경우 노즐 직경변화에 의한 웨버수의 변화가 발생하여도 분무선단 외곽표면의 궤적에는 영향을 주는 변수로 작용하지 않는다.

3) 저속 횡단유동장에서 액체제트의 분무선단 외곽표면 궤적 및 분열점은 다음의 경험식을 따른다.

- 액체제트의 분무선단 외곽표면 궤적 :

$$\frac{Y}{d_o} = 2.6q_1^{0.33} \left(\frac{Z}{d_o}\right)^{0.49}$$

- 액체제트의 액주 분열점(수직방향) :

$$\frac{Y}{d_o} = 1.72\sqrt{q_1}$$

후 기

본 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업(KRF-2007-D00084)의 지원을 받아 수행된 연구과제임.

참고문헌

- (1) Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P. and Nejad, A. S., "Breakup Processes of Liquid Jets in Subsonic Crossflows", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 1, 1997, pp. 64~7.
- (2) Inamura, T. and Nagai, N., "Spray Characteristics of Liquid Jet Transversing Subsonic Airstreams", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, No. 2, March-April, 1997.
- (3) Fuller, R. P., Wu, P. K., and Nejad, A. S., "Effects of Injection Angle on Column Breakup Processes of Liquid Fuel Jets in Subsonic Crossflows", *AIAA 1997-2966*, July 1997.
- (4) Image-Pro Express Version 4.0 for windows User Guide, Media Cybernetics, L.P, 1998.
- (5) Yates, C. L., "Liquid Injection into a Supersonic Stream", *Aero Propulsion Lab.*, Vol 1, AFAPL-TR-71-97, Wright-Patterson AFB, OH, 1972.
- (6) Geery, E. L. and Margettes, M. J., "Penetration of a High Velocity Gas Stream by a Water jet", *Journal of Spacecraft*, Vol. 6, No. 1, 1969, pp. 79~81.
- (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) Leong, M. Y., McDonell, V. G. and Samuelsen, G. C., "Mixing of an Airblast-Atomized Fuel Spray Injected Into a Crossflow of Air", *NASA CR-2000-210467*, 2000.