

횡단유동이 액체 미립화에 미치는 영향

김종현^{*1)} · 조우진²⁾ · 이인철²⁾ · 이봉수²⁾ · 구자예³⁾

경원전문대 기계자동차공학과¹⁾ · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과²⁾ · 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부³⁾

The Effect of Cross-flow on Liquid Atomization

Jong-Hyun Kim^{*1)} · Woo-Jin Cho²⁾ · In-Chul Lee²⁾ · Bong-Soo Lee²⁾ · Ja-Ye Koo³⁾

¹⁾Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University, Gyeonggi 461-702, Korea

²⁾Graduated School, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea

³⁾School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-791, Korea

(Received 5 June 2007 / Accepted 4 October 2007)

Abstract : The breakup processes and spray plume characteristics of liquid jets injected in subsonic air cross-flows were experimentally studied. The behaviors of column, penetration, breakup of plain liquid jet and droplet sizes, velocities have been studied in non-swirling cross-flow of air. Nozzle has a 1.0 mm diameter and L/d ratio=5. Experimental results indicate that the breakup point is delayed by increasing air momentum, the penetration decreases by increasing Weber number and the split angle is increased by increasing air velocity or decreasing injection velocity. SMD increases according as increasing height or decreases in accordance with increasing air velocity. 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.

Key words : Breakup point(분열점), Cross-flow(횡단유동), Penetration length(관통거리), SMD(상대평균직경), Split angle(분열각)

Nomenclature

d : nozzle orifice diameter

L : nozzle orifice length

P : pressure

q : jet momentum ratio, $\rho_i v_i^2 / \rho_a v_a^2$

T : absolute temperature

V_a : air-velocity

V_i : liquid injection velocity

W_e : weber number, $(\rho_a v_a^2 d) / \sigma_l$

μ : viscosity coefficient

ν : dynamic viscosity coefficient

ρ : density

σ : surface tension

Subscripts

a, air : cross-flow air

b : breakup point location

i : liquid injection

1. 서론

액체 연료의 미립화과정과 액적 분포는 연료의 기화 및 혼합율을 결정하는 중요한 인자가 되며, 궁

*Corresponding author, E-mail: spawn222@hau.ac.kr

극적으로 엔진의 성능과 효율에 영향을 미치게 된다. 디젤 엔진 및 직접분사식 가솔린 엔진의 분무는 흡기포트를 통해 들어오는 공기유동과 상호작용을 하며 분무의 미립화 특성은 흡기포트와 실린더 내에서의 유동에 의해 영향을 받는다.¹⁾ 횡단유동에 분사된 액체제트의 연구는 여러 분사 시스템에서 중요한 과정으로 많은 연구가 진행되고 있다.^{2,3)} 횡단유동에 분사된 액체제트는 1차분열과 2차분열 과정을 통해 더욱 미립화되며 분무특성은 운동량비(q)와 웨버수(We)에 의해서 결정된다.⁴⁾ 현재까지 횡단유동에 수직으로 분사되는 많은 연구가 수행되어 거시적 정보는 많이 발표되었지만 주위유동과 분무의 상호작용에 관한 자세한 정보는 완전히 알려져 있지 않고 있다.⁵⁾ 본 연구의 목적은 횡단유동에 분사된 액체제트를 이용하여 주위유동이 액체제트에 미치는 영향을 미시적으로 연구하고자 한다.

2. 실험구성 및 실험조건

2.1 실험조건 및 가정

실험조건 중 물과 공기의 물성 및 노즐의 기본 사양은 Table 1에 간략히 나타내었다. 대기의 조건은 $297 \pm 3K$, $1 \pm 0.05atm$ 이고 테스트 섹션의 온도, 습도는 항상 일정하며 횡단유동의 유동은 정상상태로 가정을 하였다. 그리고 액체제트에 작용하는 중력의 영향은 고려하지 않았다.⁶⁾

Table 1 Test environment conditions and properties

	Water	Air	Nozzle details
$T(^{\circ}C)$	20	20	
$P(atm)$	1	1	
$\rho(kg/m^3)$	998	1.21	
$\mu(Ns/m^2)$	$1.0e-3$	$1.81e-5$	
$\nu(m^2/s)$	$1.0e-6$	$1.5e-5$	
$\sigma(N/m)$	0.0727		

2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험은 테스트 섹션 크기가 $120\text{ mm}(H) \times 120\text{ mm}(W) \times 350\text{ mm}(L)$ 인 축류 흡입식 풍동을 사용하였으며 분무형상은 스트로브스코프와 CCD카메라를 이용하여 가시화 하였다. 그리고 위상 도플러 입자 분석기(PDPA)를 이용하여 SMD(Sauter mean diameter)와 액적 속도를 측정하였다. 트랜스미터와 리시버는 수평유지와 30° 의 각도 유지를 위해서 동일한 축으로 고정 되었으며 각 축(X/d , Y/d)에 대하여 2.5 mm 씩 이동하면서 데이터를 획득하였다. 실험장치의 구성의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 횡단유동 속도에 따른 액체제트의 분열

횡단유동에 액체제트를 분사하면 공기유동과 같은 진행방향으로 일정한 궤적을 가지며 분열이 된

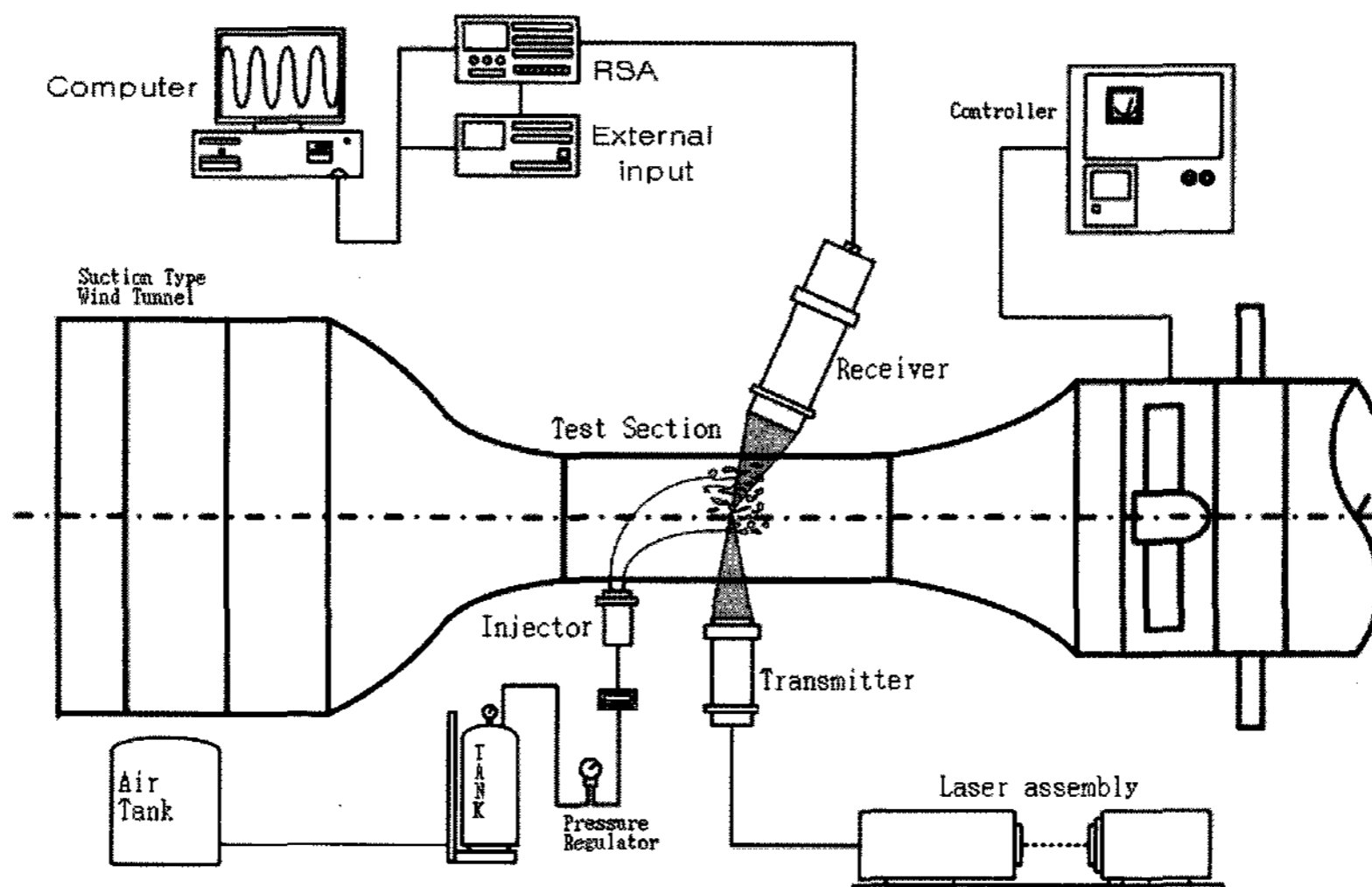


Fig. 1 Schematic of the experimental setup for studying liquid jet in cross-flow

다. 횡단유동이 액체제트에 끼치는 영향을 알기 위해서 $V_i=8.29$ m/s로 일정하게 분사하였으며 횡단유동 속도를 $V_a=26.6$ m/s, 32.85 m/s, 38.9 m/s 그리고 41.5 m/s로 변화시키면서 비교 한 것을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)을 보면 $V_i=8.29$ m/s로 분사된 액주는 노즐에서 바로 나와서 분열점이 생기기 전까지 수직으로 곧고 부드럽게 분사되는 구조를 보인다. 하지만 후에 액주는 부드러운 표면에서부터 분열을 보이면서 바람이 부는 쪽으로 퍼져나가는 것을 볼 수가 있다. 횡단유동의 속도가 증가함에 따라 액체제트의 운동량이 상대적으로 작아지게 되면서 관통 거리는 감소하게 된다. 액체제트의 표면과 액체기둥에서의 분열은 액적과 액막 등으로 발달하게 되는데 횡단유동의 속도가 증가 할수록 활발히 분열을 하는 것을 볼 수가 있으며 Fig. 2(a)의 분열점 이후에 보이는 물결과동의 간격은 횡단유동의 속도가 증가를 할수록 작아지는 것을 May Y. Leong et al.⁷⁾이 고찰한 것과 같은 결과를 얻었다.

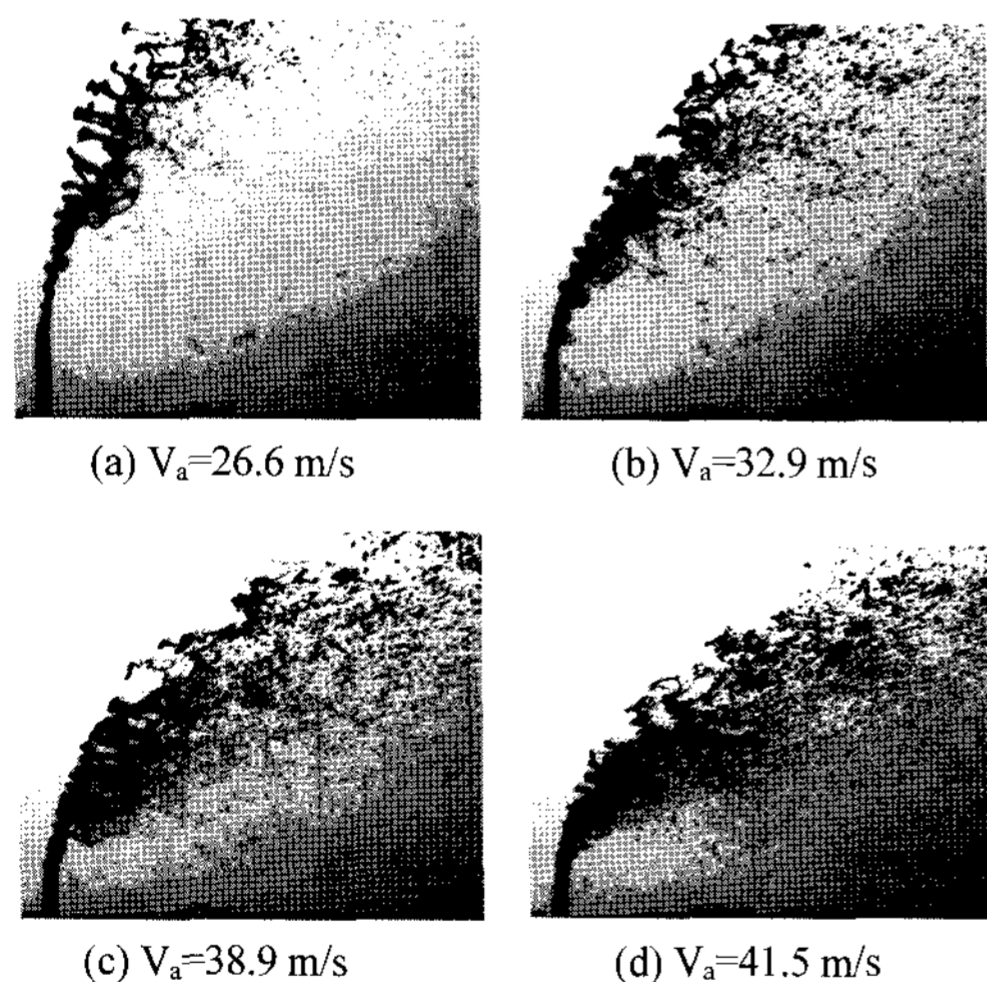
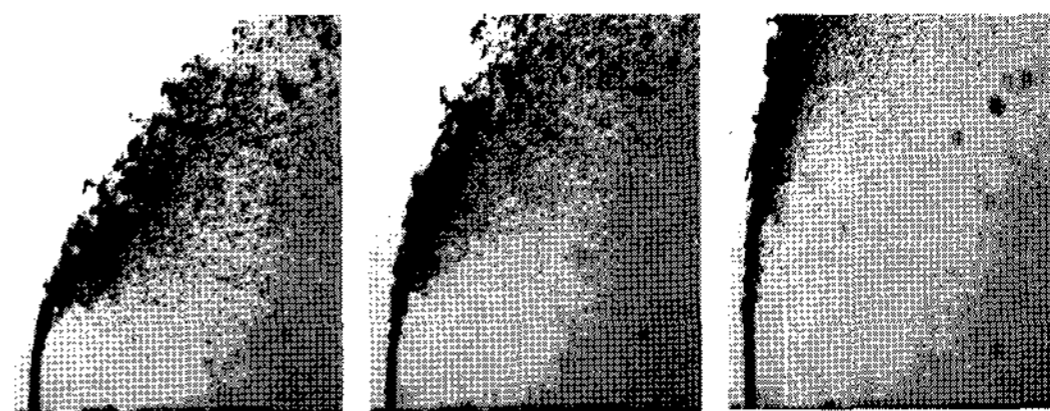


Fig. 2 Injection of water jets into cross-flow at various air-velocities

3.2 분사속도에 따른 액체제트의 분열

분사압을 단계별로 증가를 시키면서 액체제트가 횡단유동에 영향을 받아 분열되는 모습을 가시화하였다. 액체제트의 분사속도를 $V_i=7.01$ m/s, 12.14 m/s 그리고 17.16 m/s로 변화시키고 횡단유동의 속도가 $V_a=41.5$ m/s로 일정할 때 액체제트를 분사한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 분사속도가 증가함에 따라 관



(a) $V_j=7.01$ m/s (b) $V_j=12.14$ m/s (c) $V_j=17.16$ m/s
Fig. 3 Injection of water jets from various injection velocities

통거리는 증가하는 것을 볼 수가 있는데 이것 또한 액체제트의 분사 운동량이 횡단유동의 운동량보다 상대적으로 크기 때문인 것으로 분석된다. 표면분열의 모습은 분사속도가 작은 Fig. 3(a)에서 자세히 볼 수가 있었는데 Samir B. Tambe et al.⁸⁾이 고찰한 것과 같이 액주분열에서 발생하는 미립현상보다는 표면분열에서 발생하는 미립액적의 크기가 더 작아지는 것을 알 수 있었다.

3.3 운동량비의 변화에 따른 분열점의 영향

운동량비의 변화에 따른 분열점의 변화를 나타내기 위해서 Fig. 4에서처럼 기준을 정하였으며 이미지촬영을 통해 분석을 하였다. Fig. 5를 보면 운동량비가 커짐에 따라 분열점은 조금씩 상승을 하는 것을 알 수가 있는데 실험에서는 Y_b/d 을 관통거리로 정하였다. Y_b/d 가 운동량비에 따라 상승하는 것은 액체제트의 분사속도가 증가를 함에 따라 액체가 가지고 있는 운동량이 커지므로 액주가 분열을 하는 지점이 상승하는 것으로 분석된다. Fig. 6은 운동량비 변화에 따른 X_b/d 을 나타낸 것인데 운동량비가 상승 함에도 불구하고 액체제트의 분사지점은 거의 일정하게 나타나는 것을 Pei-Kuan Wu et al.^{5,6)}이 연구한 것과 동일한 결과를 얻었다.

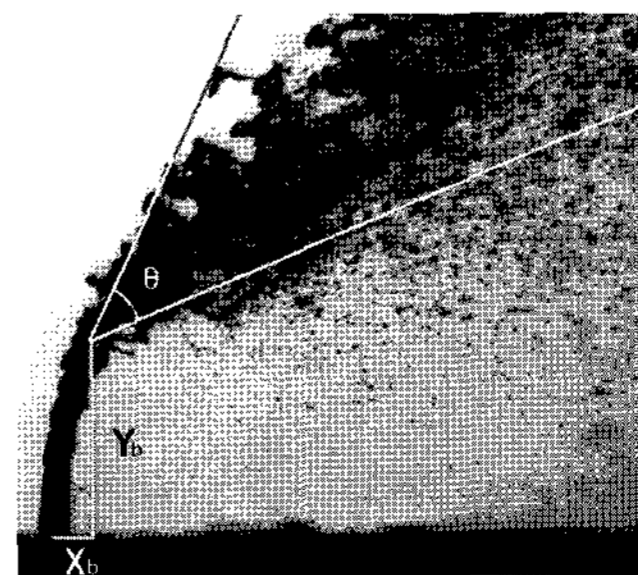


Fig. 4 The force diagram for the present phenomenological analysis

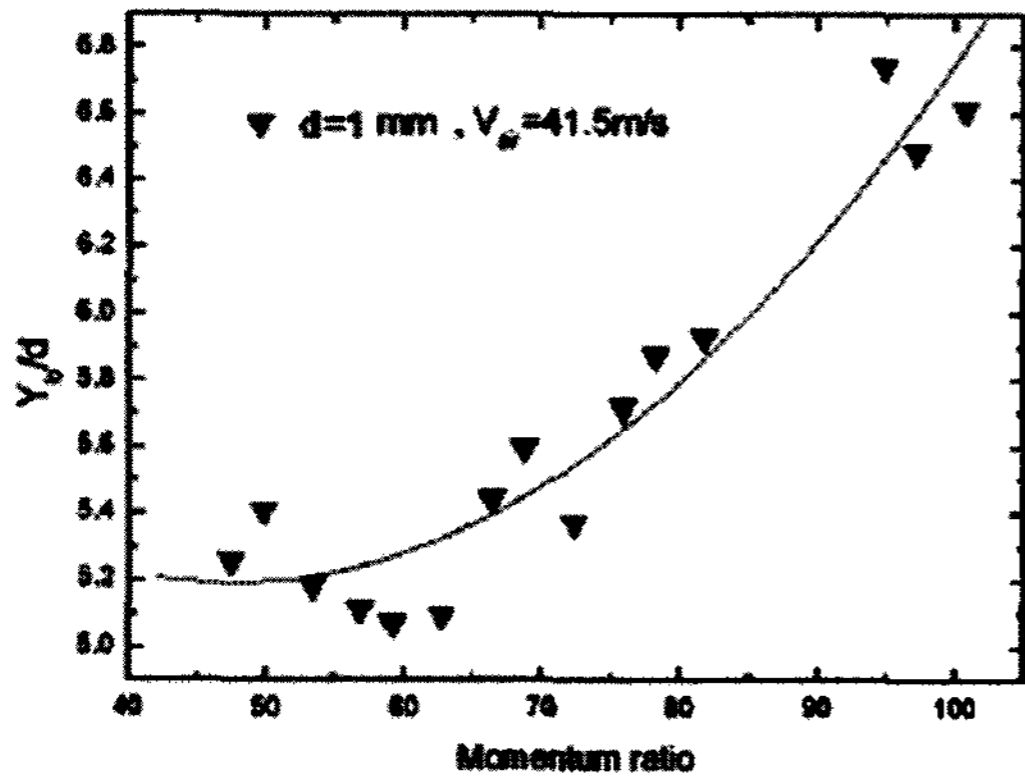


Fig. 5 Breakup point heights Y_b/d of liquid jets in cross-flow

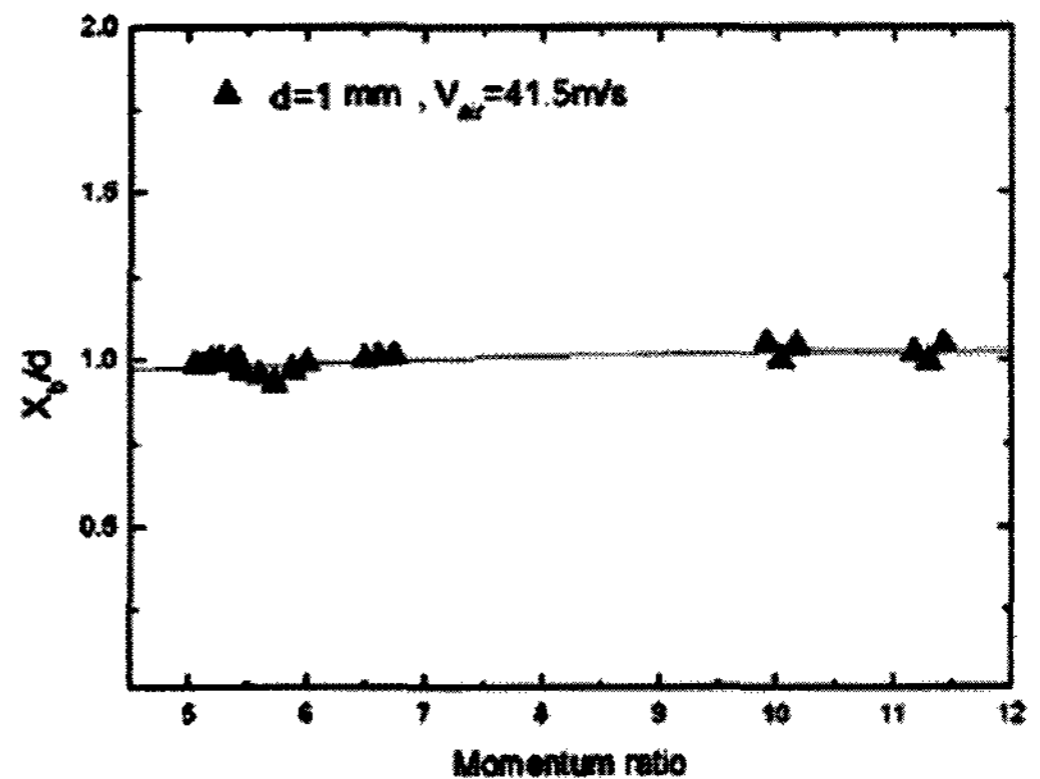


Fig. 6 Breakup point heights X_b/d of liquid jets in cross-flow

3.4 운동량비 변화에 따른 분열각의 영향

분사된 액체제트는 횡단유동과 작용을 하면서 분열점 후에 분열이 활발히 일어나고 다양한 물리적인 힘에 의해서 어느 궤적을 그리면서 발달된다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 액체제트는 분열되어져서 퍼지는 각에 차이가 있는 것을 볼 수가 있는데 Fig. 7과 Fig. 8에 분열점 이후에 퍼져나가는 분열각(split angle)의 차이를 알기위해서 Fig. 4에서 도시한 것과 같은 기준으로 각도를 측정하였다. 이 각을 연구하는 것은 분열되는 액적의 면적을 알 수 있기 때문인데 분열이 진행되어 작은 액적이 됨에 따라 상승하려는 속도성분들이 감소하고 횡단유동의 영향이 커짐에 따라 어느 일정 거리 이상부터는 미립화되는 전체 분포가 일정해지기 때문에 처음 분열 각도는 분열 진행의 분포궤적을 예상 할 수 있다. 우선 횡단유동의 속도별 분열각을 나타낸 것이 Fig. 7이다. 분

사속도는 8.29 m/s로 일정하게 분사 하였는데 액체제트가 가지는 일정한 운동량에 비해 횡단유동의 운동량이 상대적으로 커지면서 분열이 더욱 활발히 일어나고 미립화는 가속화가 되며 분열각이 커지고 더욱 넓은 영역으로 액체제트의 미립화가 진행되어졌다. 반면 Fig. 8에서는 횡단유동의 속도가 41.5 m/s로 일정할 때 분사속도별 분열각을 나타내었다.

이것을 보면 분사되는 액체제트의 속도가 커질수록 분열각이 줄어드는 것을 알 수가 있다.

3.5 액체 제트의 단면 분포 특성

액체제트를 PDPA로 분석을 함에 있어 분사된 액체제트를 Fig. 9와 같이 4영역에서 측정을 하여 횡단거리별 SMD 단면 분포도를 Fig. 10에 나타내었다. $Z/d=20$ 은 액주에서 분열된 액막이 빠르게 분열되는 구간으로 중간 영역의 SMD는 90~105 μm 로

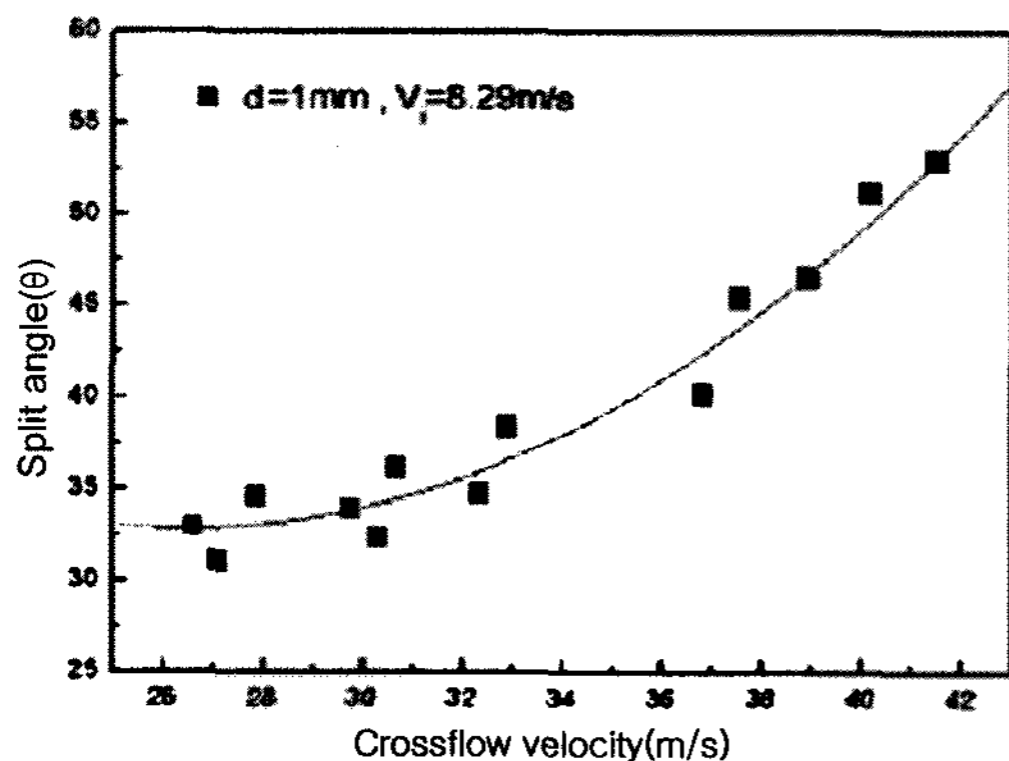


Fig. 7 Split Angle of water jets from various cross-flow velocities

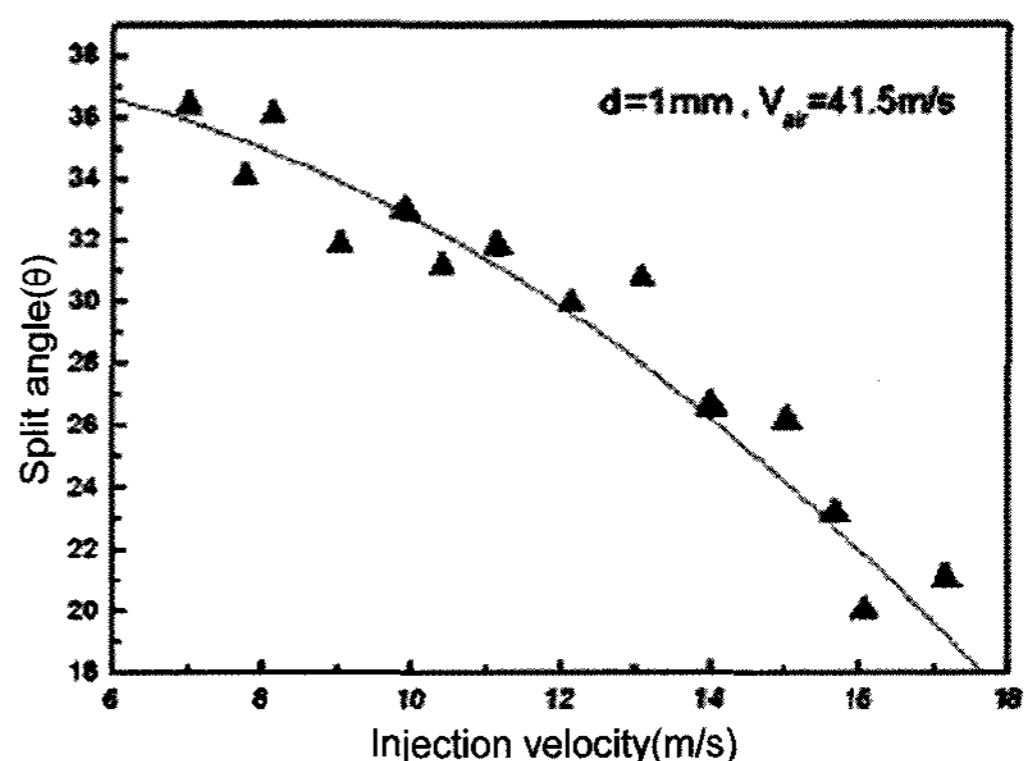


Fig. 8 Split Angle of water jets from various injection velocities

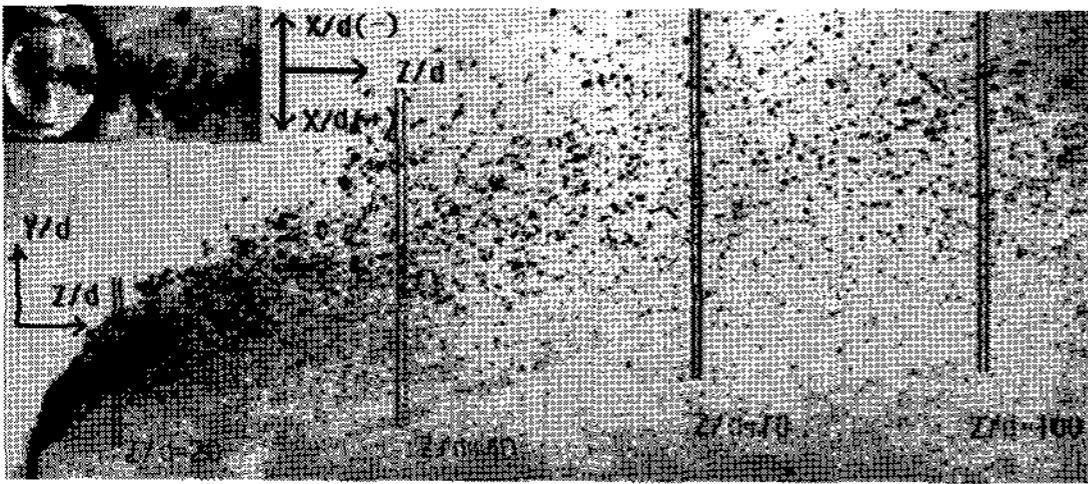
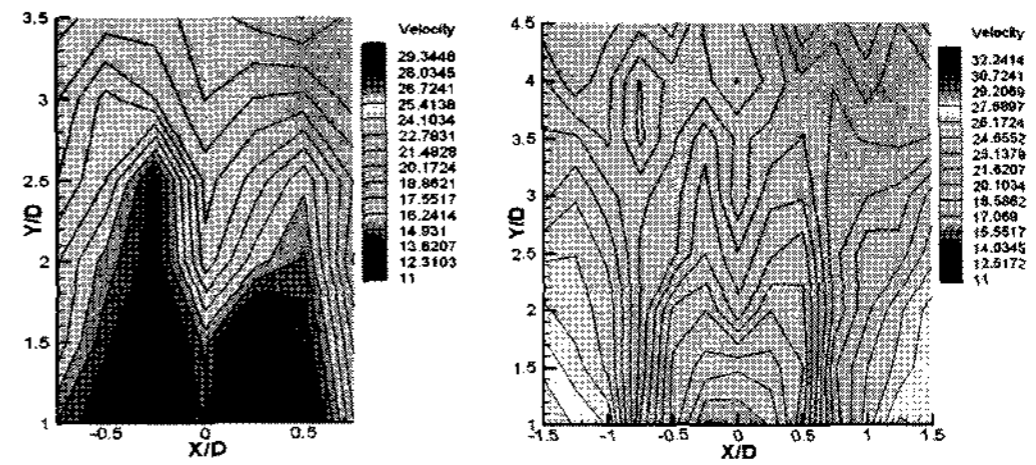
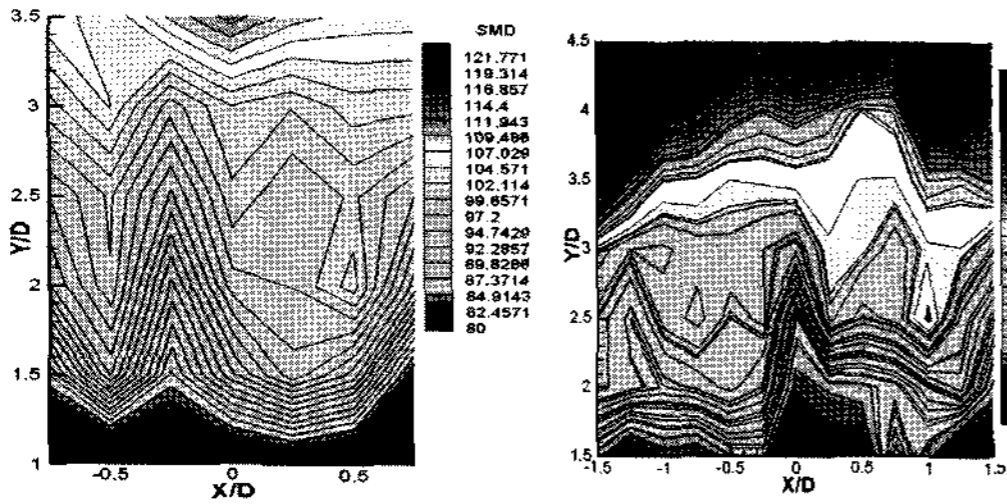


Fig. 9 Spray image of liquid jet in cross-flow



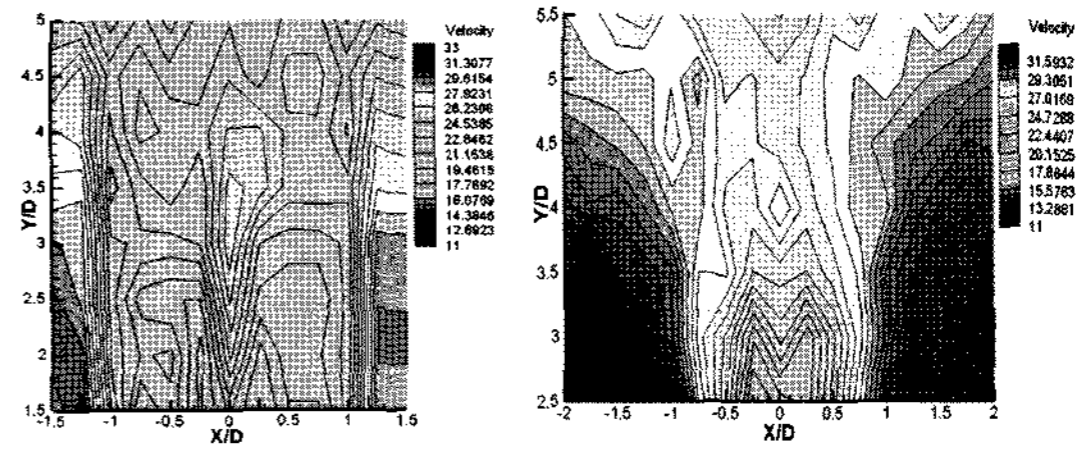
(a) Z/d=20

(b) Z/d=40



(a) Z/d=20

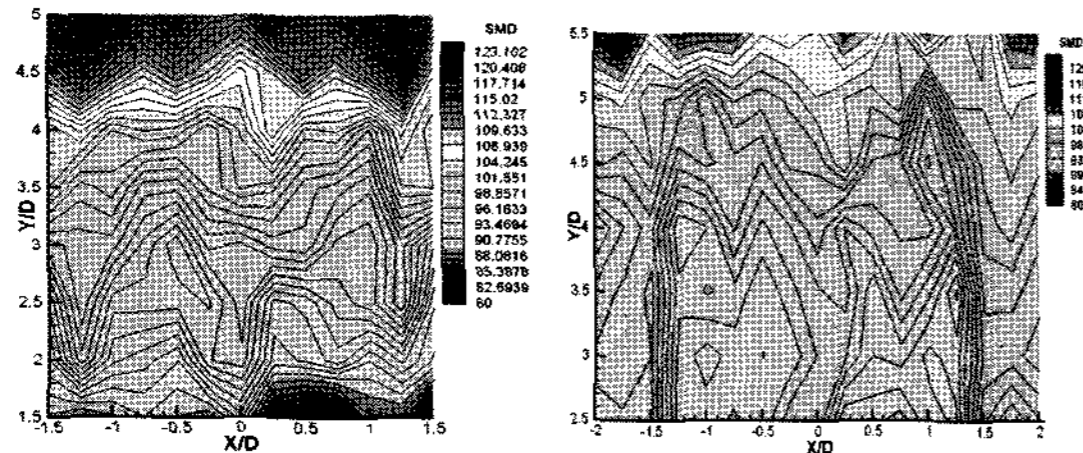
(b) Z/d=40



(c) Z/d=70

(d) Z/d=100

Fig. 11 Cross sectional distribution of velocity
($We_a=29.92, q=25.1$)



(c) Z/d=70

(d) Z/d=100

Fig. 10 Cross sectional distribution of SMD
($We_a=29.92, q=25.1$)

Z/d=40에서 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 횡단유동과 충돌하여 좀 더 분열을 거친 후에 Z/d=40 미만의 구간에서 측정 가능한 크기로 분열되어 측정된 것이다. SMD의 단면 분포는 층상 구조를 지니며 상층부의 SMD가 가장 크게 나타나며 100 μ m대의 SMD 분포가 중간 영역에 넓게 나타난다. Z/d=70의 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 90~105 μ m 정도의 균일한 경향성을

보이며 일정한 수치를 보인다. Z/d=100 이상에서도 횡단유동에 의한 액적 분열이 진행되기는 하지만 이러한 영향을 그리 크지 않다. 만일 테스트 섹션 내의 횡단 유속이 증가한다면 액적의 분열은 더욱 활발해 지고 SMD는 더욱 작아질 것이다. 운동량 교환에 따른 미립화된 액적들은 큰 횡단유동의 운동량을 지니지 않으면 횡단유동 내로의 깊숙한 침투를 할 수 없다. 액적은 항상 유동의 흐름에 대하여 수직 방향으로 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. 11은 횡단 거리별 속도 단면 분포도이다. Z/d=20의 속도 분포는 아래 영역에서 양쪽 대칭으로 나타나며 중간 이상 영역에서는 약 22 m/s로 고른 분포를 보인다. Z/d=40에서는 액적들의 수평 운동량의 교환으로 속도가 증가하였다. 바깥 영역에서는 빠른 속도 분포를 보이고 중심 영역에서는 가장 낮은 속도 분포를 보였다. 상대적으로 Z/d=20 보다 안정적인 속도 분포를 보이며 대칭으로 속도 분포가 나타난다. Z/d=70은 Z/d=40과 동일한 경향을 보이지만 속도가 약 6 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 경향이 보인다. 횡단유동 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, 액적의 수직 속도성분 때문인 것으로 파악된다.

4. 결론

수직분사된 액체제트에 횡단유동이 미립화에 미치는 영향을 사진을 통해 분석하였으며 PDPA를 사용하여 액적의 분포와 속도를 알아보았다. 연구의 주요 내용의 요약은 다음과 같다.

- 1) 액체제트가 분사됨에 있어 연료와 공기의 비에 의해서 운동량비가 구해지는데 있어 활발한 분열을 유도하는 물리적 힘으로는 횡단유동의 속도가 액체제트의 속도보다 더욱 큰 영향을 끼치는 것을 알 수가 있었다.
- 2) 액체제트의 분열점을 유동진행방향과 수직방향으로 나누어 분석을 한 결과 액체제트의 운동량비가 증가를 하면 분열점이 상승하는 현상이 있었지만 분열점이 액체제트의 분사지점에서 멀어지는 것은 아니라는 것을 알 수가 있었다.
- 3) 횡단유동의 속도가 증가함에 따라 분열각은 증가를 하는 것을 알 수가 있었으며 분사속도가 증가함에 따라 분열각은 감소하는 것을 알 수가 있었다. 분열각이 변하고 분열을 발달시키는데 분사속도의 영향에 비해 횡단유동의 속도가 미치는 영향이 크다는 것을 알 수가 있었다.
- 4) SMD 분포는 층상구조로서 Y/d 가 증가 할수록 SMD도 같이 증가하게 되며 횡단유동의 유속이 증가하면 액적이 분열되어 SMD도 작아지게 된다. 분무장은 횡단유동 방향으로 진행 할수록 넓어지며 횡단 거리별 SMD 분포는 거리가 증가 할수록 전반적으로 넓게 퍼지며 일정한 수치를 보인다.
- 5) 횡단 거리에 따른 속도 분포영역을 파악할 수 있었는데 횡단 거리가 증가 할수록 상대적으로 빠른 속도는 분무 가장자리 영역에서 측정되었으

며 낮은 속도는 분무 중심 아래 영역에서 측정되었다.

후 기

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

References

- 1) J. C. Bang, "The Effect of Combustion Process by Intensifying the Air Flow in Combustion Chamber of D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.5, pp.153-159, 2007.
- 2) P.-K. Wu, K. A. Kirkendall and R. P. Fuller, "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol.14, No.2, pp.173-182 1998.
- 3) K. C. Lin, P. J. Kennedy and T. A. Jackson, "Spray Structures of Aerated-Liquid Jets in Subsonic Crossflows," AIAA Meeting & Exhibit, pp.1-18, 2001.
- 4) T. Inamura and N. Nagai, "Spray Characteristics of Liquid Jet Transversing Subsonic Air stream," Journal of Propulsion and Power, Vol.10, No.6, pp.798-803, 1994.
- 5) P.-K. Wu, K. A. Kirkendall and R. P. Fuller, "Breakup Process of Liquid Jet in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol.13, No.1, pp.64-74, 1997.
- 6) P.-K. Wu, K. C. Lin and T. A. Jackson, "Effects of Flow Initial Conditions on Spray Characteristics With and Without Crossflows," AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp.1-12, 2005.
- 7) M. Y. Leong, V. G. McDonell, and G. S. Samuelsen, Mixing of an Airblast-Atomized Fuel Spray Injected Into a Crossflow of Air, NASA, pp.53-66, 2000.
- 8) S. B. Tambe, S.-M. Jeng, H. Monigia and G. Hsiao, "Liquid Jets in Subsonic Crossflow," 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, pp.1-13, 2006.