

횡단가스 유동에 분사되는 액체제트의 분무특성

Characteristic of Liquid Jet in Subsonic Cross-flow

고 정 빈* · 이 관 형* · 구 자 예**

Jung-Bin Ko, Kwan-Hyung Lee and Ja-Ye Koo

Abstract

The present study has numerically and experimentally investigated the spray behavior of liquid jet injected in subsonic cross-flow. The corresponding spray characteristics are correlated with jet operating parameters. The spray dynamics are known to be distinctly different in the three regimes: the column, the ligament and the droplet regimes. The behaviors of column, penetration and breakup of liquid jet have been studied. Numerical and physical models are base on a modified KIVA code. The primary atomization is represented by a wave model base on the KH(Kelvin-Helmholtz) instability that is generated by a high interface relative velocity between the liquid and gas flows. In oder to capture the spray trajectory, CCD camera has been utilized. Numerical and experimental results indicate that the breakup point is delayed by increasing gas momentum ratio and the penetration decreases by increasing Weber number.

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

1. 서 론

유체 흐름에 수직하게 또는 어느 각도를 가지고 분사되는 제트를 횡단류제트(cross-flow jet)라 하며, 횡단류에 분사되는 액체 연료 제트는 가스터빈의 후기연소기와 램제트 엔진의 연료분사장치 등 항공추진장치에서 널리 이용되고 있다. 또 추진 및 동력장치 이외에도 횡단류제트는 유동의 능동제어, 항공기의 안전성 및 성능향상용 유동제어, 터빈블레이드 등의 막냉각 등에도 이용되고 있다.

횡단류에 분사된 액체제트의 선단(공기유동방향에서 본 선단)에서는 유체 유동이 지연되고 압력이 상승하며 액체제트 후단의 앞단에서 서

로 반대방향으로 회전하는 와류(vorticity)를 형성하며 동시에 횡단류는 액체제트의 주위 가장 자리에 전단력을 주어 액체가 찢겨져 나가고, 잘게 부서지는 미립화현상이 일어나게 된다. 액체제트에서 떨어진 작은 덩어리들은 횡단류와 상호작용하여 2차 미립화를 하면서 유동장에 연료를 분포 시키게 된다. 연소장치에서 분사된 연료액적의 미립화와 연료분포는 다음 단계의 기화 및 혼합, 그리고 분무연소율을 결정하는 인자이며, 궁극적으로는 엔진의 효율과 성능에 큰 영향을 미치게 되므로, 이러한 복잡한 액체 연료의 미립화 현상을 파악하기 위해서는 실제 실험을 통한 액체 연료의 미립화 모델의 정립이 필요하다.

본 연구에서는 횡단류에 의한 분무특성을 나타내기 위해 수치적인 해석과 실험을 통하여 분

* 한국항공대학교 대학원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

무의 형상을 예측하고 실험과 비교하였다. 결과를 비교하기 위하여 액체의 모멘텀 비와 기체의 웨버수를 통하여 무차원화하였다.

2. 수치계산

수치 계산은 ALE(Alternate Lagrangian Eulerian) 방법을 사용하여 분무와 연소해석에 유용한 3차원 압축성유체역학 프로그램인 KIVA-II¹⁰⁾를 횡단류에서의 분무해석에 맞도록 수정하여 사용하였다. 노즐 직경과 동일한 초기 SMR(Sauter Mean Radius)을 가지는 "Blob"이 연속적으로 분사되면서 일련의 액적 분열 과정을 해석하는 Wave 모델을 사용하여 횡단류에서 액체 제트의 액적 분열 과정을 모델링하여 분사된 액체의 형상과 액체의 침투길이(jet penetration) 및 분무의 제적을 수치적으로 계산하고자 한다.

2.1 가정과 경계조건

Wave 모델을 사용하기 위하여 액주표면에 공기와의 상대속도에 의하여 미소 크기의 불안정파가 존재한다고 가정하고, 초기 액적은 노즐 직경과 동일한 크기를 갖는 blob으로 가정한다. 또한 액적이 구에서 원판으로 변한다는 것을 나타내는 동적 항력 모델을 공기 저항계수에 도입하였다. 난류에 대한 영향을 고려하기 위하여 난류모델은 standard $k-\epsilon$ 모델을 적용하였고 벽면법칙(law-of-the-wall)도 고려하였다.

계산 영역은 3차원의 x, y, z 좌표를 사용하였으며 사용된 격자수는 그 조밀도에 따라서 계산의 결과가 조금씩 달라질 수 있는데 본 연구에서는 $n_x=15, n_y=25, n_z=60$ 으로 설정하였다. 또한 노즐에서 분사되는 수많은 액적들을 대표하는 액적군의 개념인 "parcel"의 개수는 4000으로 설정하였다.

주위압력, 벽면의 온도와 초기 유입 공기의 온도는 계산결과와 실험결과의 정확도를 위해 실험에서의 주위 조건과 일치하도록 하였으며 분사되는 액적의 증발과 액적 상호간의 충돌이 각각의 액적에 미치는 영향도 고려하였다.

2.2 지배방정식

Kelvin-Helmholtz 이론을 바탕으로 한 Wave 모델은 기본적으로 반경 r 을 갖는 모액적(parent droplet)으로부터 반경 r_c 를 갖는 새로운 액적들로 분열이 일어나며 이 새로운 액적들의 반경은 다음과 같이 나타내어진다.¹¹⁾

$$r_c = B_0 \Lambda_{KH} \quad (1)$$

여기서 Λ_{KH} 는 KH wave의 최대 성장을 Ω_{KH} 에 대응하는 파장(wavelength) 를 나타내며 B_0 는 상수로써 그 값은 0.61 정도이다. 또한 최대 성장률 Ω_{KH} 과 Λ_{KH} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_{KH} = \frac{0.34 + 0.38 We_g^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f r^3}} \quad (2)$$

$$\Lambda_{KH} = \frac{9.02r(1+0.45\sqrt{Z})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.865 We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (3)$$

여기서 가스의 Weber number는 $We_g = \rho_g U_r^2 r / \sigma$ 이고, Ohnesorge number Z 는 $Z = \sqrt{We_l} / Re_l$ 로 나타내어진다. 또한 U_r 은 가스와 액체의 상대속도이며 σ 는 표면 장력, ρ_g 와 ρ_l 은 각각 가스와 액체의 밀도를 나타낸다. 액체의 Weber number는 $We_l = \rho_f U_r^2 r / \sigma$ 이고 액체의 Reynolds number 는 $Re_l = \rho_f U_r r / \mu_f$ 이며 여기서 μ_f 는 액체연료의 점성을 나타낸다. 최종적으로 Taylor number T 는 다음의 식으로 계산된다.

$$T = Z \sqrt{We_g} \quad (4)$$

액적의 분열과정 동안에 모액적(parent droplet)은 질량의 감소에 따라 그 직경도 줄어들게 된다. 모액적(parent droplet)의 반경 변화율은 다음의 식을 사용한다.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{r - r_c}{\tau_{KH}} \quad (5)$$

여기서 τ_{KH} 는 액적분열시간을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{KH} = \frac{3.726 B_1 r}{\Omega_{KH} \Lambda_{KH}} \quad (6)$$

상수 B_1 은 10~60사이의 값 중에서 상황에 따라 다양하게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 Xin 등¹²⁾이 권장한 값인 40을 사용하였다.

액주의 분열 직후의 액적들에는 Weber number와 Ohnesorge number에 해당하는 만큼의 2차 분열(Secondary Breakup)과정이 발생하게 된다.¹³⁾ 이 과정에서 액적의 분열은 변형기간(deformation period) t_{def} 에 의해 특징지어진다. 변형 기간 동안에 액적은 판(disk)형상으로 변형되며 항력 계수(drag coefficient)와 액적 전면의 직경이 증가한다. 여기서 액적의 특성시간(characteristic time)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$t^* = \frac{(D_0/U_r)}{\sqrt{\rho_l/\rho_g}} \quad (7)$$

여기서 D_0 는 액적의 초기 직경이다.

또한 변형 기간(deformation period) t_{def} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{14,15)}

$$t_{def} = 1.6t^* \quad (8)$$

결국 변형 기간을 포함하여 액적의 총 분열 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{14,15)}

$$\frac{t_b}{t^*} = \begin{cases} 6(We-12)^{-0.25} & 12 < We < 18 \\ 2.45(We-12)^{0.25} & 18 < We < 45 \\ 14.1(We-12)^{-0.25} & 45 < We < 351 \\ 0.766(We-12)^{0.25} & 351 < We < 2670 \\ 5.5 & 2670 < We \end{cases} \quad (9)$$

여기서 We 는 $We = \rho_g u_{rel}^2 D_0 / \sigma_l$ 로서 총 분열시간의 Weber number를 나타낸다.

변형 기간 동안에 액적의 전면 직경은 최대

치로 증가되며 그 값은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{D}{D_0} = 1 + 0.19 \sqrt{We} \frac{t}{t_{def}} \quad (\text{if } t < t_{def}) \quad (10)$$

변형 기간에서 고려해야 할 또 다른 중요한 변수인 항력 계수(drag coefficient) C_D 는 판형상의 액적에서, 구형 액적(spherical droplet)의 항력 계수보다 증가되며 다음과 같이 정의된다.

$$C_D = (C_D)_{sphere} \left(1 - \frac{t}{t_{def}}\right) + (C_D)_{disk} \frac{t}{t_{def}} \quad (11)$$

여기서 $(C_D)_{disk} = 1.2$ 이다.¹³⁾ 변형 기간 후에 액적의 전면 직경과 항력 계수는 변형 기간이 끝나는 때의 마지막 값으로 일정하게 한다.

액적 분열 이후의 Sauter Mean Diameter (SMD) D_{32} 는 다음과 같이 나타내어진다.¹⁵⁾

$$\frac{SMD}{D_0} = 1.5 \frac{Oh^{0.2}}{We_{corr}^{0.25}} \quad (12)$$

여기서 We_{corr} 는 수정된 Weber number ($Oh > 0.1$ 일 경우 높은 액체 점성에 대하여 수정하여 적용되는 Weber number)로써¹⁵⁾ $We_{corr} = We / (1 + 1.077 Oh^{1.6})$ 이다.

3. 실험 조건 및 실험 장치

흡입식 풍동을 이용하여 횡단 유동 가스에 분무되는 액체 제트의 가시화를 실험하였다. 실험실의 온도와 습도 등의 환경 조건은 매 실험마다 기록하였고 평균적으로 약 10°C로 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. 실험 환경 조건의 가스와 액체 제트의 열역학적 물성치는 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Measurement of test environment condition and properties.

	Water	Air
T(°C)	20	10
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

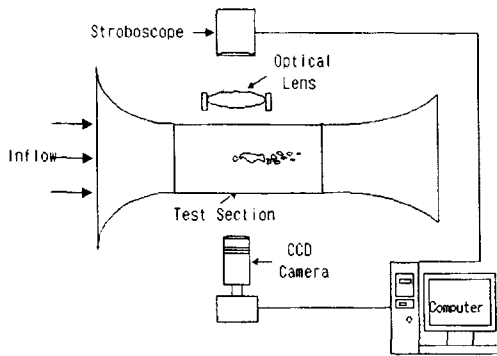


Fig 1. Schematic of Cross-flow system

테스트 섹션의 크기는 150mm의 정사각형의 단면적과 350mm의 길이이며 분무형상은 스트로보스코프와 CCD카메라를 이용한 그림자기법 (shadowgraphy)을 이용하여 가시화 하였다. 노즐은 직경 0.3mm에 단일구멍을 사용하였으며 액주와 액적 및 분무가 잘 보이도록 렌즈와 카메라를 위치시켰다. 압축 공기를 이용하여 가압 조절장치를 통해 균등한 가압을 하였으며 광원의 타이밍과 카메라를 컴퓨터에 연결하여 분무형상을 실시간으로 관찰하였다. 그림 1은 실험 장치의 구성도이다.

4. 결과 및 고찰

횡단유동 가스 내부에 분사되는 액체 제트의 분무특성을 알아보기 위하여 실험을 통한 해석을 수행하였고 그 결과를 비교하기 위하여 KIVA code에 횡단류 내부에 분사되는 액체제

트에 대한 현상 해석에 적합하도록 수정된 물리적 모델들을 적용하여 수치 해석하였다.

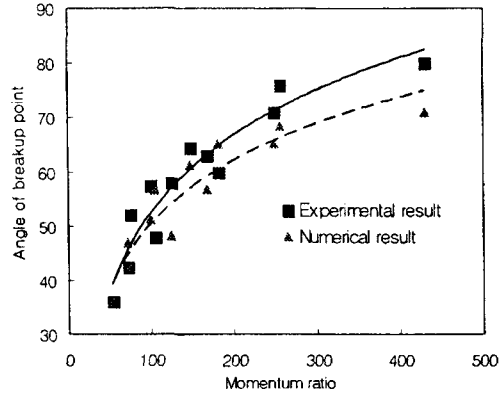


Fig 2. Angle of breakup point versus momentum ratio

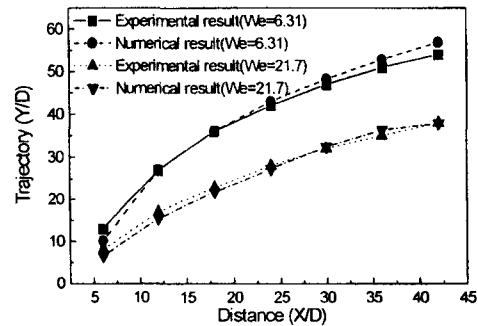


Fig 3. Comparison with experimental and numerical results at same Weber number

그림 2와 3은 breakup point에서의 기울기와 액체제트의 횡형상을 실험과 수치해석과 비교해보았다. 실험과 계산결과의 오차가 조금나지만 실험 오차를 감안하면 대체로 비슷한 결과를 보여주고 있다. 모멘텀비가 증가할수록 기울기는 증가하다가 증가폭이 점차적으로 감소하였다.

그 결과를 수치해석과 실험해석으로 나누어 각각의 결과 그림들과 함께 설명하였으며 실험 데이터와 수치적 데이터를 비교한 결과 대체적으로 일치하는 결과를 얻었다.

4.1 수치해석결과

wave 모델을 사용하여 실험조건과 동일한 환경에서 계산을 수행하였다. 그림 4는 액체 제트의 분사속도 25.7m/s, 유입되는 공기의 속도 65m/s에서의 액적 분열 형상을 나타낸다. 노즐에서 분사되는 액체 제트는 공기류와 수직으로 충돌하여 분열되며 모액적으로부터 연속적으로 분열되어 나가는 작은 액적들의 모습을 잘 보여주고 있다. 액적들은 각각의 3차원 좌표와 온도 및 직경에 대한 데이터를 갖고 있다.

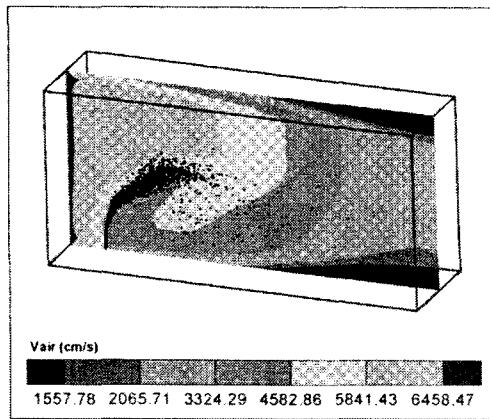


Fig 4. Schematic of injected liquid jet

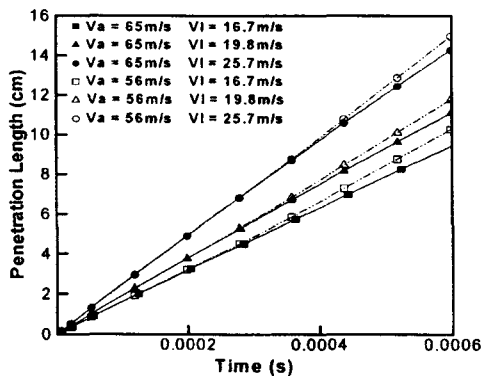


Fig 5. Penetration length as a function of the time

그림 5는 노즐에서 액체가 분사된 직후부터 계산된 시간에 따른 액체 제트의 침투 길이를 나타내고 있다. 액체의 분사속도는 각각 16.7,

19.8, 25.7m/s이며 유입공기의 속도는 56, 65m/s에서 계산된 결과이다. 그림에서처럼 액체 제트의 침투 길이는 분사되는 액체의 속도가 클수록, 그리고 유입되는 공기의 속도가 작을수록 증가하는 결과를 나타내었다. 이것은 분사 속도 증가에 따른 관성력과 유입공기의 관성력 차에 의한 결과이다.

그림 6에서는 유입되는 공기의 속도가 증가될때 액체의 분사속도 16.7, 19.8, 25.7m/s에 대하여 각각의 최대 침투길이를 보여주고 있다.

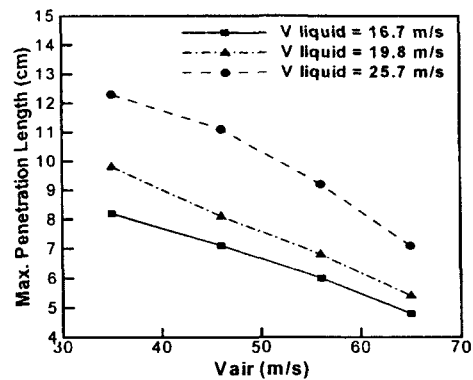


Fig 6. Max. penetration length as a variation of the air velocity

최대 침투 길이는 분사속도가 클수록 증가하게 되는데 유입되는 공기의 속도가 증가하면서 그 길이는 점차적으로 감소하게 된다. 이것은 Fig. 2에서 설명하였던 결과와도 잘 부합되는 것으로서 수치해석에 적용하고 있는 물리적 모델들이 횡단류에 분사되는 액체 제트의 거동을 비교적 정확하게 예측하고 있다는 결론에 근거를 더해 주는 결과이다. 차후에 characteristic time과 항력계수 C_D 등과 같은 변수들에 대하여 실험결과와의 비교 분석을 통해 더욱 정확한 상수 값들을 결정할 수 있다면 더욱 정확한 수치해석 결과를 도출해 낼 수 있을 것이다.

4.2 실험해석결과

결과를 비교하기 위해서 무차원 변수인 웨버 수는 유동가스의 관성력과 액체제트 마찰력의

비이다. 온도가 변하여 유동가스의 온도가 변함에 따라 웨버수가 변하게 되며 일반적으로 액체 제트의 입자 분열과 형상에 사용된다. 모멘텀 비는 유동 가스의 모멘텀에 대한 액체 제트 모멘텀의 비이다. 웨버수는 액체의 표면장력과 밀접한 관계를 가지며 유동의 모멘텀이 증가할수록 액체 제트의 모멘텀을 방해하여 표면 장력을 약화시켜 분열이 빠르게 일어나게 한다. 다음은 웨버수와 모멘텀비 식이다.

$$We = \frac{\rho_a v_a^2 D}{\sigma_l} \quad (14)$$

$$q = \frac{\rho_l V_l^2}{\rho_a V_a^2} \quad (15)$$

Inamura의 실험을 통한 모멘텀비를 이용한 경험식과 본 실험의 결과와 비교해보았다.¹⁶⁾

$$\frac{Y}{D} = (1.2 + 0.4D)q^{0.36} \ln[1 + (1.56 + 0.48D)\frac{X}{D}] \quad (16)$$

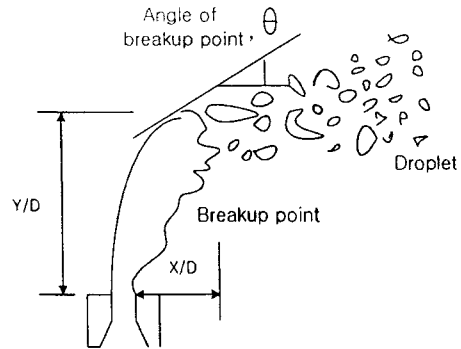


Fig 7. Variable for analysis from result

그림 7은 형상을 이용하여 결과를 비교하기 위해 측정하는 변수 값들이다. Breakup point는 액주에서 ligament, droplet이 시작하는 부분으로 설정했으며 breakup point의 위치는 Y/D로 나타내었다. 또한 breakup point에서의 기울기 θ 와 X/D를 각각 모멘텀비와 웨버수로 비교하였다.

그림 8은 가시화하여 CCD로 캡처한 분무의 형상이다. 모멘텀비와 웨버수에 따라 액주의

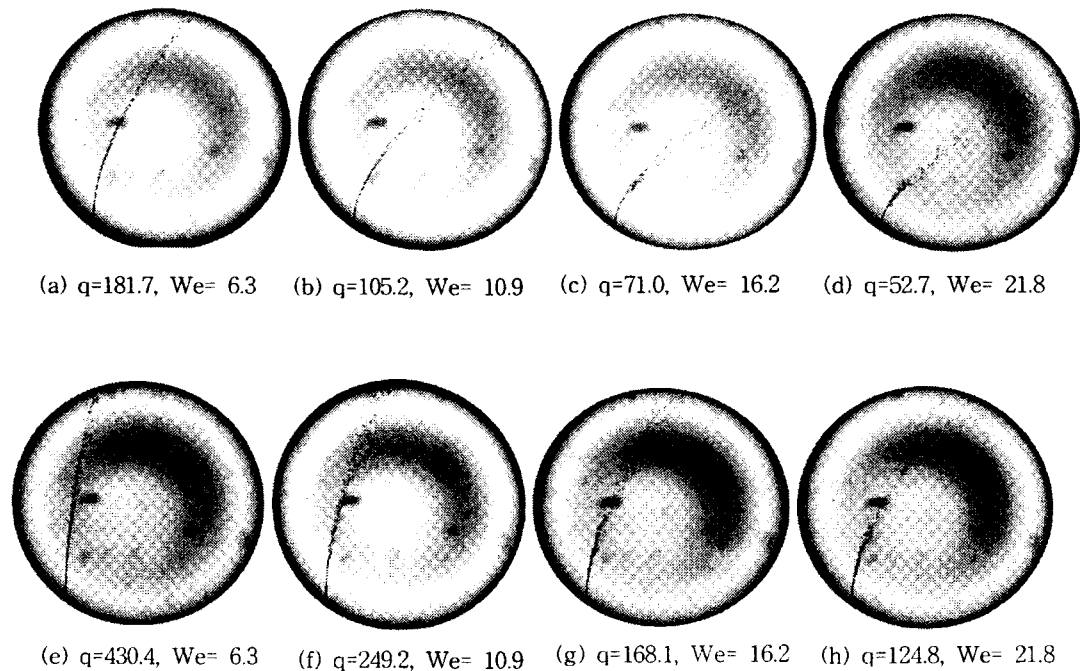


Fig 8. Result of spray shape of liquid jet in Cross-flow

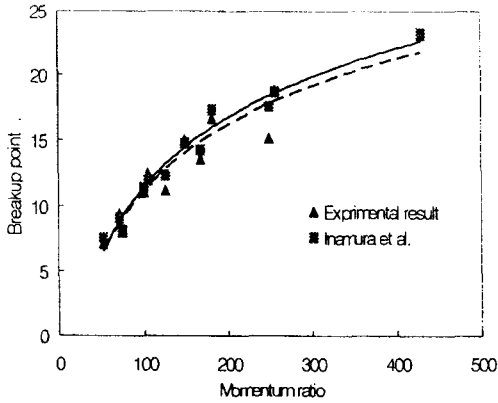


Fig 9. Breakup point at different momentum ratio

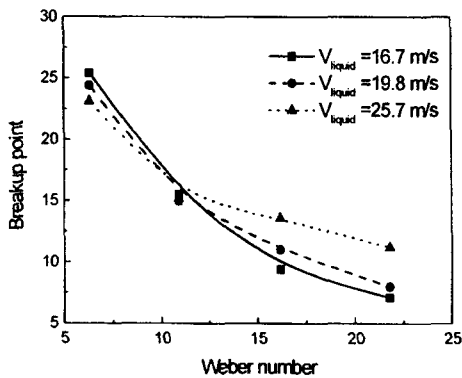


Fig 10. Breakup point versus Weber number at different Liquid jet velocity

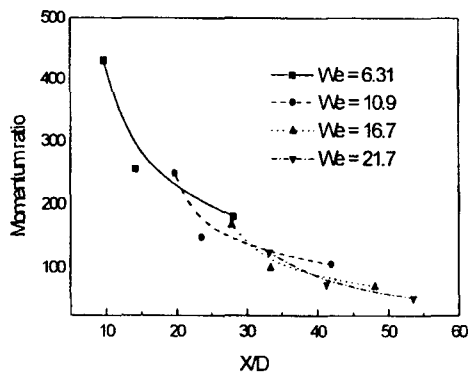


Fig 11. Momentum ratio versus penetration of x-axis at different Weber number

휘는 정도가 틀러지며 모멘텀비가 작을수록 휘는 형상이 증가하는 경향을 보였다.

그림 9는 모멘텀비 변화에 대한 breakup point를 실험 결과와 Inamura의 경험식의 결과를 나타내었다. 경험식과 같은 경향성을 갖으나 모멘텀비만 고려한 경험식이므로 실험 결과와 약간의 오차가 발생하였다. 모멘텀비가 감소할 수록 액체제트의 breakup point(Y/D)가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 모멘텀비가 작아질 수록 횡단 유동의 모멘텀이 강해지므로 액체제트의 표면 장력을 빠르게 무너뜨려 액체분열의 길이가 낮아지는 것을 알 수 있다.

그림 10은 웨버수에 대한 breakup point를 액체 제트의 속도에 따라 나타내었다. 액체제트가 증가하면 액주분열 거리가 감소하며 액체제트가 속도가 낮을수록 웨버수 증가에 따른 감소율이 높았다. 웨버수 10에서 breakup point가 거의 동일하다가 10을 지나면서 높은 액체제트의 속도가 분열이 낮은 속도보다 분열이 늦게 일어남을 볼 수 있다.

그림 11은 X방향의 침투길이(X/D)에 대한 모멘텀의 값이다. 웨버수의 증가는 횡단 유동의 증가에 비례하므로 웨버수가 증가할수록 침투길이는 낮아지며 모멘텀비가 낮아지면 그림 5에서와 같이 액체제트의 표면 장력이 낮아지므로 x방향으로의 침투길이가 길어진다. 또한 모멘텀비와 웨버수가 서로 반비례하고 있음도 볼 수 있다.

4. 결론

횡단가스유동에 수직으로 분사되는 액체제트의 분무특성을 가시화 실험과 수치해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 횡단류에 분사되는 액체제트의 궤적 특성은 수치해석이 실험결과를 비교적 정확하게 예측하였지만 모멘텀비에 따른 breakup point는 약간의 오차가 있었다. 적용한 wave 모델은 고온 고압에서의 디젤연료 분사에 적합하도록 개발된 것으로서 breakup point 수치계산은 실제 실험결과와 약간의 오차가 발생하였다. 액체제

트의 액주 후방에 발생하는 후류에 대한 영향을 고려하는 횡단류 유동에 적용될 수 있는 새로운 모델을 개발한다면 액주 분열에 대한 더욱 정확한 해석이 가능할 것이다.

2. 모멘텀비가 증가하면 액체제트의 분열 거리는 비례하여 증가하지만 점차적으로 증가폭이 감소한다.
3. 액주의 분열은 웨버수가 증가하면 특성 길이가 낮아지지만 액체제트의 속도가 낮을수록 웨버수의 증가에 액주의 분열이 빠르게 일어난다.
4. 모멘텀비가 낮아지고 웨버수가 증가할수록 x방향의 침투길이가 늘어나지만 모멘텀비와 웨버수는 서로 반비례한다.

참고 문헌

1. Liu, A.B. and Reitz, R.D., "Mechanisms of Air-Assisted Liquid Atomization," *Atomization and Sprays*, Vol.3, pp.1-21,1992.
2. Krzeczowski, S.A., "Measurement of Liquid Droplet Disintegration Mechanism," *Int.J.Multiphase Flows*, Vol.6, pp.227-239,1980.
3. Wu, P.K. and Feath, G.M., "Aerodynamic effects on Primary Breakup of Turbulent Liquids," *Atomization and Sprays*, Vol.3, pp.265-289,1993.
4. Ranger, A.A. and Nicholls, J.A., "The Aerodynamic Shattering of Liquid Drops," *AIAA J.*, Vol.7, pp285-291,1969.
5. O'Rourke, P.J. and Amsden, A.A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," *SAE Trans.* 872089, 1987.
6. Ibrahim, E.A., et al., "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," *J. of Propulsion and Power*, Vol.9, No.4, pp 651-654, 1993.
7. Tanner, F.X., "Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporation Diesel Fuel Sprays," *SAE Paper* 970050, 1997.
8. 박종훈, 황상순, 윤영빈, "액적의 변형 및 분열의 정확한 예측을 위한 공기역학적으로 진보된 APTAB 모델," *한국액체미립화학회지* 제5권, 제2호, pp 53-60,2000.
9. Reitz, R.D., "Modeling Atomization Processes in High-pressure Vaporizing Sprays," *Atomization and Sprays Technology*, Vol.3, pp.309-337, 1987.
10. Amsden, A.A., O'Rourke, P.J. and Butler T.D., "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," *Los Alamos National Laboratory Report No. LA-11560-MS*, 1989.
11. Beale, J.C. and Reitz, R.D., "Modeling Spray Atomization with The Kelvin-Helmholtz / Rayleigh-Taylor Hybrid Model," *Atomization and Sprays*, Vol.9, pp.623-650, 1999.
12. Xin, J. Ricart, L. and Reitz, R.D., "Computer Modeling of Diesel Spray Atomization and Combustion," *Combustion Sci. Technol.*, Vol.137, 1-6, p.171, 1998.
13. Madabhushi, R.K., "A Model for Numerical Simulation of Breakup of a Liquid Jet in Crossflow," *Atomization and Sprays*, Vol.24., pp.889-912, 2003.
14. Pilch, M. and Erdman, C.A., "Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceleration-Induced Breakup of Liquid Drop," *Int. J. Multiphase Flows*, Vol.12, pp.741-757, 1987.
15. Schmehl, R. Klose, G. Maier, G. and Wittig, S., "Efficient Numerical Calculation of Evaporating Sprays in Combustion Chamber Flows," *Proc. Symp. of the Applied Vehicle Technology Panel on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels*, Lisbon, Portugal, pp.51.1-51.13, 1998.
16. Inamura, T., Nagai, N., Yoshimura, K., Kumakawa, A. and Yatsuyanagi, N. "Spray formation and spray combustion in ramjet combustor", *Proc. The ASME/JSME Thermal Engineering*, Honolulu, pp.157-162, 1995.