

횡단류를 이용한 액체제트의 분무 및 분열 특성 실험

고정빈* · 이관형* · 문희장** · 구자예**

Experimental Study of Spray Characteristics of Liquid jet in Cross-flow

Jung-Bin Ko* · Kwan-Hyung Lee* · Hee-Jang Moon** · Ja-Ye Koo**

ABSTRACT

The spray characteristics of liquid jet injected in subsonic cross-flow were investigated numerically and experimentally. The behaviors of column, penetration and breakup of plain liquid jet in non-swirling cross-flow of air have been studied. Numerical and physical models are based on a modified KIVA II code. The primary atomization is represented by a wave model based on the KH(Kelvin-Helmholtz) instability that is generated by a high interface relative velocity between the liquid and gas flows. CCD camera has been utilized in order to capture the spray trajectory. The nozzle diameter was 0.5 mm and its L/D ratios were between 1 and 5. Numerical and experimental results indicate that the breakup point is delayed by increasing gas momentum ratio, the penetration decreases by increasing Weber number and the turbulent or nonturbulent liquid jet is obtained at different L/D ratio.

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

1. 서 론

횡단류제트(cross-flow jet)는 가스터빈의 후기 연소기와 램제트 엔진의 연료분사장치 등 항공 추진장치에서 널리 이용되고 있다. 또 추진 및 동력장치 이외에도 횡단류제트는 유동의 능동제어, 항공기의 안전성 및 성능향상을 위한 유동제어, 터빈블레이드 등의 막냉각 등에도 이용되고 있다. 그러므로 액체 연료의 미립화와 분포는 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 KIVA-II¹⁾를 이용한 수치적인 해석과 CCD카메라를 이용한 가시화 실험을 통하여 분무의 형상을 예측하고 실험과 비교하였다. 결과를 비교하기 위하여 액체의 모멘텀비와 기체의 웨버수를 통하여 무차원화 하였다.

* 한국항공대학교 대학원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
연락처, E-mail: jykoo@hau.ac.kr

2. 수치계산

수치 계산은 ALE(Alternate Lagrangian Eulerian) 방법을 사용하여 분무와 연소해석에 유용한 3차원 압축성유체역학 프로그램인 KIVA-II¹⁾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 궤적을 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-ε* 모델을 적용하였고 벽면법칙(law-of-the-wall)도 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.²⁾

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

여기서 Λ_{KH} 는 KH wave의 최대 성장률 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.

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

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

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. 실험환경 조건의 가스와 액체 제트의 열역학적 물성치는 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Test environment conditions and properties.

	Water	Air
T(°C)	20	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

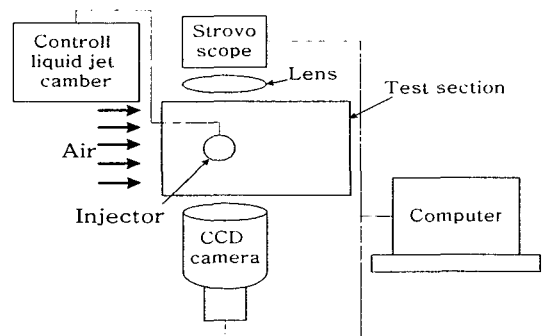


Fig 1. Schematic of Cross-flow system

그림 1은 실험 장치의 구성도이다. 테스트 섹션의 크기는 H 150 mm × W 150 mm × L 350 mm이며 분무형상은 스트로보스코프와 CCD카메라를 이용하여 가시화 하였다. 노즐은 직경 0.5mm에 단일구멍을 사용하였으며 압축 공기를 이용하여 가압 조절장치를 통해 균등한 가압을 하였으며 광원의 타이밍과 카메라를 컴퓨터에 연결하여 분무형상을 실시간으로 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

횡단유동 가스 내부에 분사되는 액체 제트의 분무특성을 알아보기 위하여 실험을 통한 해석을 수행하였고 그 결과를 비교하기 위하여 KIVA II code에 횡단류 내부에 분사되는 액체제트에 대한 현상 해석에 적합하도록 수정된 물리적 모델들을 적용하여 수치 해석하였다. 횡단류에 분사된 액체제트의 선단(공기유동방향에서 본 선단)에서는 유체 유동이 지연되고 압력이 상승하며 액체제트 후단의 양단에서 서로 반대방향으로 회전하는 와류(vorticity)를 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 분포 시키게 된다.

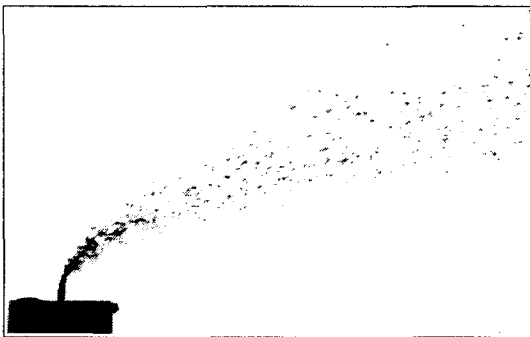


Fig 2. Spray structure of liquid jet in crossflow at $We = 26.19$, $q = 18.01$, $L/D = 3$

실험 결과의 타당성을 검증하기 위해서 웨버 수와 모멘텀비를 이용하여 Wu 의 경험식³⁾과 수치해석 결과를 비교 검증하여 보았다.

$$We = \frac{\rho_a v_a^2 D}{\sigma_l} \quad (4)$$

$$q = \frac{\rho_l V_l^2}{\rho_a V_a^2} \quad (5)$$

$$\frac{Y}{D} = 4.3 \left[Q \left(\frac{X}{Y} \right) \right]^{0.33} \quad (6)$$

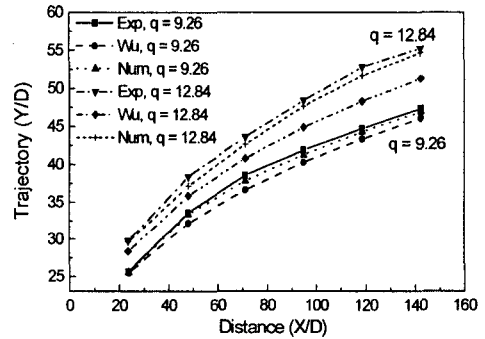


Fig 3. Comparison of experimental data with numerical data and Wu at el.

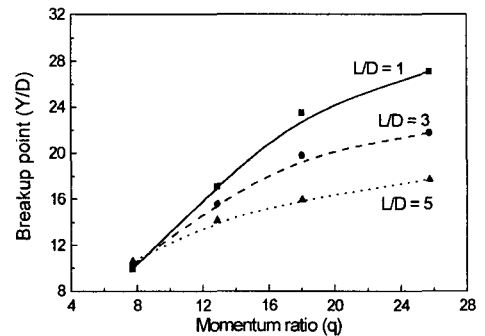


Fig 4. Breakup point versus momentum ratio with different L/D ($We = 26.2$)

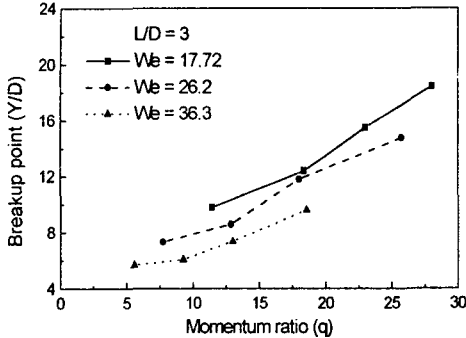


Fig 5. Breakup point versus momentum ratio with different Weber number ($L/D = 3$)

Figure 2는 CCD 카메라를 이용하여 그림자기법을 이용하여 촬영한 사진이다. 노즐 출구에서부터 column의 모습과 액주로부터의 surface breakup과 breakup된 액적의 모습이 선명하게 볼 수 있다.

Figure 3에서와 같이 액주의 trajectory는 실험 결과와 Wu의 경험식과 수치해석 결과가 대체로 일치하였으나 웨버수의 영향을 고려하지 않은 Wu의 경험식은 웨버수에 의한 오차가 발생하였으나 수치해석의 결과와는 일치하였다.

L/D 에 의한 영향은 Fig 4에서 나타나듯이 L/D 가 증가할 수록 분열점이 낮아지게 되며 액체제트와 횡단류의 비율인 모멘텀비가 증가하면 액체제트의 모멘트가 증가하게 되므로 분열점은 높아지게되며 L/D 가 클수록 분열점의 증가율이 감소했다.

액체제트의 표면장력에 의한 횡단류의 영향을 나타내는 웨버수 변화에 대한 분열점은 Fig 5에서처럼 웨버수가 증가할 수록 횡단류의 속도에 의해 표면장력이 무너져서 분열점은 낮아지며 또한 Fig 4와 5에서 보는바와 같이 동일 웨버수

에서 모멘텀비가 증가하면 분열점도 높아지게 된다.

5. 결 론

횡단류에 의한 액체제트의 분무 및 분열 특성을 제한된 실험 여건 내에서 결과를 측정하기에 애로사항과 실험적 오차가 많이 발생하였다. 본 실험과 수치해석을 통하여 비교 분석하여서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. L/D 가 클수록 분열점이 감소하였고 모멘텀비가 클때 L/D 에 의한 액주 분열점의 차가 크다.
2. 모멘텀비가 일정할 때 웨버수가 증가할 수록 액적의 분열점이 감소하였다.
3. 웨버수가 일정할 때 모멘텀비가 증가할 수록 액적의 분열점이 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. 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.
3. Wu, P.-K., Kirkendall, K.A., Fuller, R.P., Gruber, M.R., and Nejad, A.S., "Spray Trajectories of Liquid Fuel Jets in Subsonic Crossflows," 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Seoul, Korea, August 1997, pp. 545-552