

비정상 난류 유동장에서 수직 분사 액주의 분열 및 기화에 관한 LES

양승준* · 성홍계**

LES of breakup and atomization of a liquid jet into cross turbulent flow

Seungjoon Yang* · Hong-Gye Sung**

ABSTRACT

LES(Large eddy simulation) of breakup and atomization of a liquid jet into cross turbulent flow was performed. Two phase flow between a gas phase and a liquid phase was modeled by a mixed numerical scheme of both Eulerian and Lagrangian methods for gas and liquid phases respectively. The first and second breakup of liquid column was observed. The penetration depth in cross flow was comparable with experimental data for several variant of a liquid-gas momentum flux ratio by varying liquid injection velocities. SMD(Sauter Mean Diameter) distribution downstream of jet was analyzed.

초 록

비정상 난류 유동장으로 분사되는 액체 제트의 액주 분열과 미립화 현상에 관한 LES를 수행하였다. 기체상태의 공기 유동 해석에 오일러리안 해법을 사용하고, 액적 추적을 위하여 라그랑지안 해법을 사용하여 기체-액체간 이상유동(two phase flow) 해석을 수행하였다. 액주의 1차 및 2차 분열이 관찰되었다. 일정한 속도로 유입되는 공기유동 중에 액체 분사 속도를 달리하여, 액체-기체 운동량 플럭스 비의 변화를 고려하여 액체 제트의 침투깊이를 조사하였으며 실험결과와 유사함을 알 수 있었다. 제트 후류에서 입자 평균직경에 대한 분석을 수행하였다.

Key Words: Liquid column breakup(액주분열), Atomization(액적미립화), Two phase flow(이상유동), Penetration depth(침투깊이), Large eddy simulation(대와동모사)

1. 서 론

액체 연료를 사용하는 공기 흡입식 고속추진기관의 연소특성은 연료의 미립화(atomization) 및 공기-연료 혼합(mixing) 과정에 의해 큰 영향을 받는다. 현재까지 연소실에서의 공기-연료 미립화와 혼합과정은 대부분 실험에 의존하여 연구가 진행되어왔다. 하지만, 고속 추진기관의 공

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

기-연료 미립화 및 혼합과정 실험은 흡입 공기가 연소실에 머무르는 시간이 매우 짧고, 화염면이 매우 얇고, 비정상(unsteady)으로 인해, 매우 높은 난이도와 고비용의 실험을 필요로 한다. 따라서 기상-액상 이상유동(two phase flow)의 수치적 연구가 그 대안으로 대두되고 있다. 연소실 이상유동의 수치적 해석은 공급되는 공기 유동의 난류 특성을 해석하는 것과 함께, 액상으로 공급되는 연료의 분무특성을 해석하는 과정이 필요하다. 현재 이상유동의 해석은 1980년대 이후 개발된 다수의 실험적 분무 모델을 적용하고 있다. 본 연구에서는 이상유동의 수치적 해석을 위하여 기상에 대해서는 Eulerian, 액상에 대해서는 Lagrangian 해석기법을 적용하였다. 비정상 난류 유동장의 해석에 있어 LES의 적용은 분사 액체 제트와 주 유동장에 대해 보다 자세한 정보를 도출할 수 있고, 결과적으로 액적의 분열/미립화 현상을 모사하는 보다 발전된 수치해석 기술을 제공할 것이다.

2. 수치해석기법

2.1 지배 방정식

지배 방정식은 직교좌표계의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = \dot{\rho}_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_{s,i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial [(\rho E + p)u_i]}{\partial x_i} = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + \dot{Q}_s \quad (3)$$

2.2 LES(Large eddy simulation) 난류 모델

LES기법은 계산격자에 의해 포획 가능한 scale과 모델링 되어야 하는 scale을 구분하기 위해 지배방정식의 분해와 Filtering 과정이 필요하며, 정해진 top-hat 필터의 범위 내에서 구한 유한체적법에서 정의된 셀(cell) 평균을 본 연구에 적용하였다.

지배방정식의 분해는 밀도변화의 영향을 고려하여, Favre-averaging 법을 사용하며, 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} = \tilde{S}_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{\rho} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \tau_{ij}^{sgs})}{\partial x_j} + \tilde{F}_{s,i} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial ((\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\tilde{u}_i \tilde{\tau}_{ij} + \lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} - H_i^{sgs} + \sigma_i^{sgs} \right) + \tilde{Q}_{s,i} \quad (6)$$

위 식에서 나타나는 미종결항은 subgrid-scale 중 압축성 smagorinsky 모델을 사용하였다.[1]

2.3 액적 분열 모델

액적 분열 모델링에 라그랑지안 해석법인 확률 분리유동 모델링을 사용하였다. Kevin-Helmholtz 불안정성에 따른 KH 모델을 1차 미립화 과정에 적용하고, Rayleigh-Taylor 모델을 2차 미립화 과정에 적용했다.

$$r = B_0 \Lambda \quad (\text{if } B_0 \Lambda \leq a)$$

$$r = \min \{ (3\pi a^2 U / 2\Omega)^{0.33}, (3a^2 \Lambda / 4)^{0.33} \} \quad (7)$$

$$\frac{da}{dt} = - \frac{(a-r)}{\tau_{KH}} \quad (8)$$

$$\tau_{KH} = \frac{3.726 B_1 a}{\Omega_{KH} \Lambda_{KH}} \quad (9)$$

Equation (7)~(9)는 모액적 반경 a 로부터 생성되는 액적의 반경 r 을 도출하는 지배방정식으로, KH 모델의 액적 반경 r 에 관한 상수 B_0 는 Reitz[2]가 제안한 0.61을 사용했으며, 분열시간 상수 B_1 는 O'Rourke와 Amsden[3]이 제안한 1.73을 사용했다.

2.4 수치 기법

수치 기법으로 밀도기반의 유한체적법을 사용하였으며, 시간적분에 4차 Runge-Kutta, 공간적분에 Rai와 Chakravarthy[4]에 의해 제안된 4차 중앙차분을 사용하였다. 또한, 수치적 안정화를 위해 Swanson and Turkel[5]에 의해 제안된 것과 유사한 수치적 소산을 적용하였다.

2.5 병렬 기법

LES에 적용한 많은 양의 계산 격자와 액적유동 계산에 적용한 라그랑지안 해법의 계산을 효율적으로 처리하기 위해 계산 영역을 Multi block으로 나누고, Pentium 4 급 PC 클러스터를 통한 병렬계산을 MPI(Message Passing Interface) 기법으로 수행하였다.

3. 계산 격자 구성 및 계산 조건

3.1 계산 격자 구성

계산을 위해 38.1×25.4×50.8 mm 크기의 3차원 직사각형 이음속 유동장에 약 150만 개의 격자를 사용하였다. 계산의 효율을 위해, 전체 유동장은 유동방향을 따라 8개의 block으로 구성하였다.

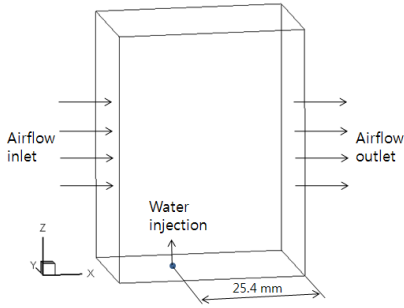


Fig. 1. Computational domain

3.2 계산 조건

모든 계산은 1 기압, 297 K, $V_{air}=125$ m/s 의 공기 유동에 분사되는 액체의 분사속도를 변화하면서 액체-기체의 모멘텀비 q 의 변화에 따라 계산하였다. 분무액체는 297K의 물을 사용하였다.

Table 1. Water injection conditions

q	9	12	18	27
V_j (m/s)	13.0	15.0	18.4	22.5

4. 계산 결과

4.1 액적 분무 LES 결과

Figure 2 는 $q=18$ 일 때의 유동속도와 액적 분포를 나타낸다. 1차 미립화가 발생하는 액주 뒤쪽으로 기체-액체 간 상호작용으로 인한 유속의 감소와 와류 분포형태가 잘 포착되었으며, 분열된 액적은 분포 영역의 위쪽으로 갈수록 큰 직경의 입자가 분포하고 있다.

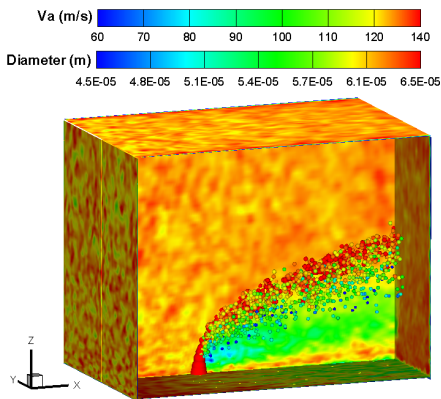


Fig. 2. Turbulent flow field and liquid break up of water injection

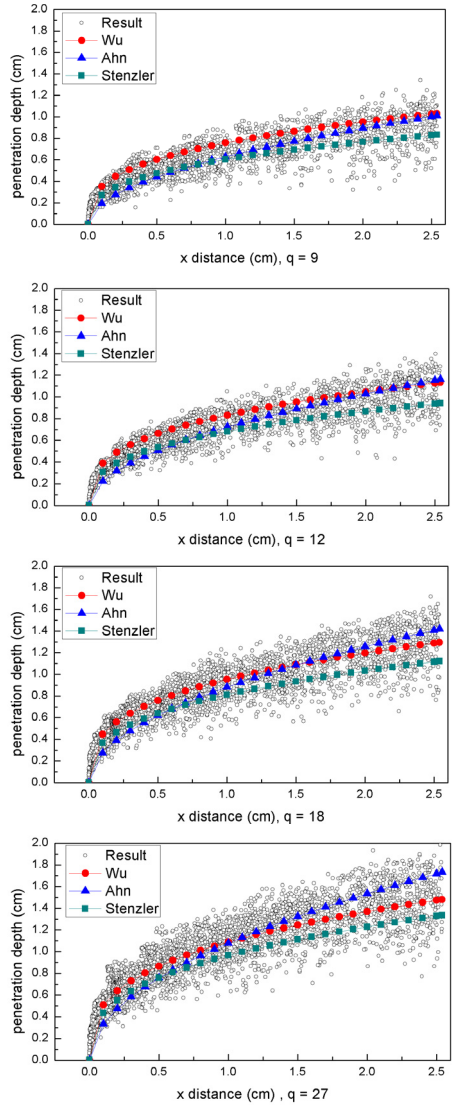


Fig. 3. Penetration depth with several different liquid-gas momentum flux ratio

4.2 액적 침투 깊이

액적침투 깊이는 수치해석 결과와 Wu[6], Stenzler[7], Ahn[8]등의 실험에서 얻은 경험식의 결과와 비교하였다.

$$y_t/d = 4.3q^{0.33}(x/d)^{0.33} \quad : \text{Wu (10)}$$

$$y_t/d = 2.584q^{0.429}(x/d)^{0.347} \quad : \text{Stenzler (11)}$$

$$y_t/dq = 1.297(x/dq)^{0.509} \quad : \text{Ahn (12)}$$

액적의 가장 위쪽 침투깊이는 $q=9\sim 27$ 의 전 영역에서 경험식 결과와 유사하였다. 특히 $q=9, 12$ 의 작은 q 영역에서는 Wu 의 실험 결과와 아주 유사한 결과를 얻었다.

$q=18$, 27 영역에서 다소 차이가 커지는 것을 알 수 있는데 q 의 영역을 고려하여 액적 분열 모델의 조정이 필요함을 보여주고 있다. 그러나 액적분열이 넓은 공간에 분포하고 있으므로 실험식 간에서도 다소 다르게 표현되고 있음을 알 수 있다.

4.3 액적 평균 직경(SMD)

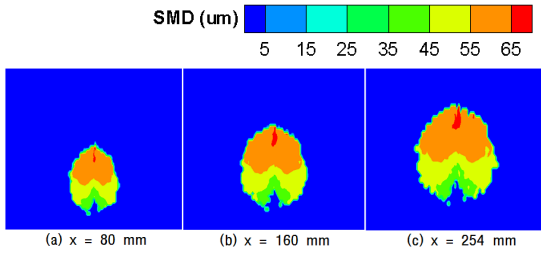


Fig. 4. SMD distribution along the x-axis

Figure 4는 분사위치로부터 유동 방향을 따라 표현된 SMD 분포이다. SMD=65 μm 이상의 액적이 액적군의 가장 위쪽 중심에 국소적으로 위치하며, 액적크기에 따라 상부/중부/하부 세 영역으로 구분된 분포를 나타내는데 이는 액적의 크기가 클수록 관성이 크므로 침투깊이가 커지기 때문이다.

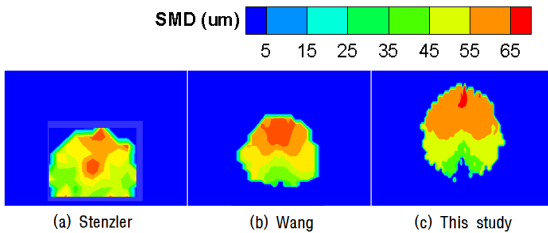


Fig. 5. Comparison of SMD distribution at $x/d=100$

Figure 5는 $q=18$ 의 조건에서 수행한 Stenzler의 실험결과와 수치결과 비교이다. 실험 결과와 다소 차이가 나는 액적형성을 보인다. 그러나 Fig. 3에서 Stenzler의 결과가 Ahn과 Wu의 결과에 비하여 침투 깊이가 작으므로 Ahn과 Wu의 실험결과와 본 연구의 결과가 유사함을 볼 때, Stenzler와 다른 연구자의 실험 데이터(SMD 분포)를 확보하여 비교 분석이 필요하다.

5. 결 론

비정상 난류 유동장에서 액적 분열 특성에 관한 LES 해석을 수행하였던 액체-기체 모멘텀 비(q)의 변화에 따른 침투 깊이 결과를 기존의 실험

식과 비교하였다.

1) 낮은 q 영역에서 정확한 결과를 얻었으며 q 가 증가할수록 실험식과의 오차가 증가한다. q 가 증가할수록 액적 분열은 넓은 공간영역에서 일어나기 때문에 수치적으로 뿐 만아니라 실험적으로도 차이가 날 수 있는 성질이 내재되어 있다.
2) SMD는 전체영역에 65~5 μm 범위로 분포하고 있으며, 액적군의 상부/중부/하부로 구분되어 분포한다. Stenzler의 실험과 Wang의 수치결과와 비교한 SMD 분포는 다소 오차를 보였으나, Wu 및 Ahn의 결과와는 침투깊이가 비교적 일치하므로 SMD 실험자료를 확보하여 본 연구 결과와 비교 분석이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Sung, H.G., "Unsteady Flowfield in an Integrated Rocket Ramjet Engine and Combustion Dynamics of a Gas Turbine Swirl Stabilized Injector", Ph.D. Thesis, The Penn State Univ, 1999
2. Reitz, R.D., "Modeling Atomization Processes in High-pressure Vaporizing Sprays," Atomization and Sprays Technology, Vol.3, pp.309~337, 1987
3. O'Rourke, P.J. and Amsden, A.A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE Trans., 872089, 1987
4. Rai, M. M., Chakravarthy. S., "Conservative High-order Accurate Finite Difference Method for Curvilinear Grids," AIAA Paper 93-3380, 1993
5. Swanson, R. C. and Turkel E. "On Central-Difference and Upwind Schemes," J. Computational Physics, 101, pp. 292-306, 1992
6. Wu, P. K., Kirkendall, K. A., Fuller, R. P., and Najad, A. S., "Spray Trajectories of Liquid Fuel Jets in subsonic Crossflows," 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Seoul, Korea, pp. 545-552, 1997
7. Stenzler, J.N., Lee. J.G. and Santavicca. D.A., "Penetration of liquid jets in a crossflow," AIAA 2003-1327, 2003
8. Ahn, K., Kim. J., Yoon. Y., "Effects of Orifice Internal Flow on Transverse Injection into Subsonic Crossflows: Cavitation and Hydraulic Flip," Atomization and Sprays, Vol.16, No.1, 2006
9. Wang. S., Yang. V., "Large-Eddy Simulation of Spray-Field Dynamics in Cross Flows," AIAA 2005-0729, 2005