

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(6), 447-454(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.6.447

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

LES 해석에서 액체제트의 분열에 대한 확률론적 분열 모델링 비교

유영린*, 성홍계**

Stochastic Model Comparison for the Breakup and Atomization of a Liquid Jet using LES

YoungLin Yoo* and Hong-Gye Sung**

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**

ABSTRACT

A three-dimensional two-phase large eddy simulation(LES) has been conducted to investigate the breakup and atomization of liquid jets such as a diesel jet in parallel flow and water jet in cross flow. Gas-liquid two-phase flow was solved by a combined model of Eulerian for gas flow and Lagrangian for a liquid jet. Two stochastic breakup models were implemented to simulate the liquid column and droplet breakup process. The penetration depth and SMD(Sauter Mean Diameter) were analyzed, which was comparable with the experimental data.

초 록

난류 유동장으로 분사되는 두가지 형태의 액체 제트 (수평분사는 디젤연료와 수직분사는 물)의 액주 분열과 미립화 현상에 관한 이상(Two-phase) 유동에 대해 3차원 LES 수치해석을 수행하였다. 기체상태의 공기 유동은 오일러리안 해법을 사용하고, 액체 제트의 액적 추적은 라그랑지안 해법을 사용하여 기체-액체간 이상유동 해석을 수행하였다. 두 종류의 확률론적 분열 모델(Stochastic breakup model)을 사용하여 액적 분열을 모사하였으며, 액체제트의 침투깊이와 액적 분포(Sauter Mean Diameter)를 실험결과와 비교하여 미세하게 분열되는 액체 제트의 분열 현상에 대해 확률론적 분열 모델링의 적합성을 제시하였다.

Key Words : Liquid column breakup(액주분열), Stochastic breakup model(확률론적 분열모델), Two phase flow(이상유동), Penetration depth(침투깊이), LES(Large eddy simulation, 대와동모사)

1. 서 론

액체 연료의 직접 분사 방식으로 구동되는 추진기관(가스터빈, 램제트, 자동차 엔진 등)은 연료의 미립화(atomization)와 공기-연료 혼합

(mixing)과 같은 연료 분무 특성에 의해 엔진의 연소 특성이 크게 영향을 받는다. 고속 추진기관의 연료 미립화와 공기-연료 혼합과정 실험은 흡입 공기가 연소실에 머무르는 시간이 매우 짧고, 액체 연료 분무 특성에 관한 정확한 계측의

† Received : January 31, 2017 Revised : May 25, 2017 Accepted : May 25, 2017

* Corresponding author, E-mail : hgsung@kau.ac.kr

II. 본 론

2.1 수치해석기법

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

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

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

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

LES기법은 계산격자에 의해 포획 가능한 크기와 모델링 되어야 하는 크기를 구분하기 위해 지배방정식의 분해와 필터링(Filtering) 과정이 필요하며, 필터링은 유한체적법에서 정의된 셀(cell) 평균 기법을 본 연구에 적용하였다. 필터 크기는 셀 부피의 1/3승이다.

지배 방정식의 분해는 Favre-averaging 법을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

여기서 상침자 SGS는 아격자 스케일 모델(subgrid-scale model)을 의미한다. 아격자 응력 텐서를 모사하기 위해 동적(Dynamic) Smagorinsky 모델[18]을 적용했다.

Gorokhovski et al.의 확률론적 분열 모델[8-12]은 모액적으로 부터 분열된 자액적의 개수가 모액적의 크기에만 의존한다는 실험적 분석에 의해 Fokker-Planck 차분 방정식으로 유도된 다.

$$\frac{\partial \Psi(\chi, t^*)}{\partial t} = - \frac{\langle \zeta \rangle}{\tau_{bu}} \frac{\partial \Psi(\chi, t^*)}{\partial \chi} + \frac{1}{2} \frac{\langle \zeta^2 \rangle}{\tau_{bu}} \frac{\partial^2 \Psi(\chi, t^*)}{\partial \chi^2} \quad (7)$$

여기서 t^* 는 분열 시간 τ_{bu} 에 대해 정규화된 시간이고, $\Psi(\chi, t^*)$ 는 $\chi = \ln(r/r_0)$ 에 대한 누적분포함수이다. 확률론적 분열 모델에서의 분

열 파라미터는 $\langle \zeta \rangle = \int_{-\infty}^0 \zeta S(\zeta) d\zeta$, $\langle \zeta^2 \rangle = \int_{-\infty}^0 \zeta^2 S(\zeta) d\zeta$

이고, 각각 1차, 2차의 분열 강도 스펙트럼 모멘트를 의미한다. 본 연구에서는 모델 논문[8]에서 사용된 기본 값인 $\langle \zeta \rangle = -0.3$, $\langle \zeta^2 \rangle = 0.14$ 를 사용했다.

모액적의 반경에 대한 로그분포인 초기 델타 함수는 정상상태 분포를 따른다면 Fokker-Planck 방정식은 다음과 같아진다.

$$\Psi(r) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln(r/r_0) - \langle \zeta \rangle}{\sqrt{2 \langle \zeta^2 \rangle}} \right) \right] \quad (8)$$

액적 분열은 액적의 수명이 분열 시간을 초과할 때 발생한다고 가정한다. 분열 시간은 액적의 고유 주파수와 액체-기체의 상대 속도 변동으로 인한 액적 표면의 불안정성과 관계하고 다음과 같다.

$$\tau_{bu} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \frac{r}{u} \quad (9)$$

반면에 Jones et al.의 확률론적 분열 모델[13-17]은 추정된 두 액적의 분열 메커니즘(Presumed binary breakup mechanism)에 의해 분열 후의 자액적의 크기를 다음과 같은 확률 밀도 함수로부터 얻는다.

$$\Psi(D^*) = \frac{D^{*2} [D^{*2/3} - A^{5/3}] [(1 - D^{*3})^{2/9} - A^{5/3}]}{\int_{D^*_{\min}}^{D^*_{\max}} D^{*2} [D^{*2/3} - A^{5/3}] [(1 - D^{*3})^{2/9} - A^{5/3}] dD^*} \quad (10)$$

여기서 $D^* = d/d_0$, $A = d_c/d_0$, $d_{\min} = (12\sigma / (\rho_g \beta d_0))^{3/2} \epsilon^{-1}$, $d_c = (12\sigma / (\beta \rho_g))^{3/5} \epsilon^{-2/5}$ 이다.

2.2 계산 조건

본 연구에서 사용된 계산 영역은 Fig. 1과 같이 폭(W) 28.9 mm, 높이(H) 25.8 mm, 그리고

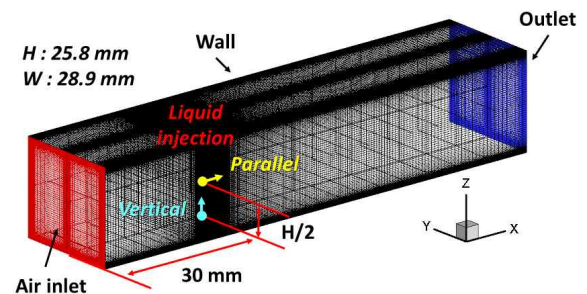


Fig. 1. Schematics of boundary conditions and grid system

길이 130 mm의 3차원 사각 덕트이다. 선행 연구[19]에서 약 330만 개의 격자로 난류 운동 에너지의 Frequency spectra를 수행했고, 격자의 개수가 적절함을 파악했다. 또한 계산의 효율을 위해 총 132개의 다중블록을 사용하여 MPI (Message Passing Interface) 병렬연산 기법을 적용하였다.

평행분사와 수직 분사의 계산 조건은 실험데이터가 존재하는 것을 택하였다. 평행분사는 공기에 디젤을 고압 분사하여 액체 제트의 침투 현상을 관찰하였으며, 수직분사는 빠른 유속(125

m/sec)의 공기속으로 수직으로 물을 분사하여 제트의 침투 깊이와 분열을 관찰하였다. 자세한 계산 조건은 Table 1과 같다. 두가지 경우에 대하여 Gorokhovski et al. 와 Jones et al. 의 확률론적 분열 모델을 적용하였다.

2.3 계산 결과

2.3.1 수평 분사

Figure 2, 3은 액체 디젤 제트의 평행분사에 대하여 두가지의 확률론적 분열 모델을 적용한 결과를 도시한 모습이다. 액주(liquid column)에서 1차 분열로 떨어져 나온 액적들이 후류로 갈수록 더 작은 액적들로 2차 분열되는 것을 알 수있다. Gorokhovski et al. 모델이 Jones et al. 모델보다 분열이 더 잘되어 액적의 관성이 작아져 액체 제트의 공기 내 침투 속도가 작은 반면에 작은 액적들은 분산이 넓게 퍼짐을 알 수 있다. Fig. 4, 5는 액체 제트가 분사됨에 따라 액체

Table 1. Computational conditions

Case	Injection Method	P_a (MPa)	U_a (m/s)	U_{inj} (m/s)	Liquid
1	Parallel	10.0	0.1	102.0	Diesel
2	Vertical	0.1	125.0	12.5	Water

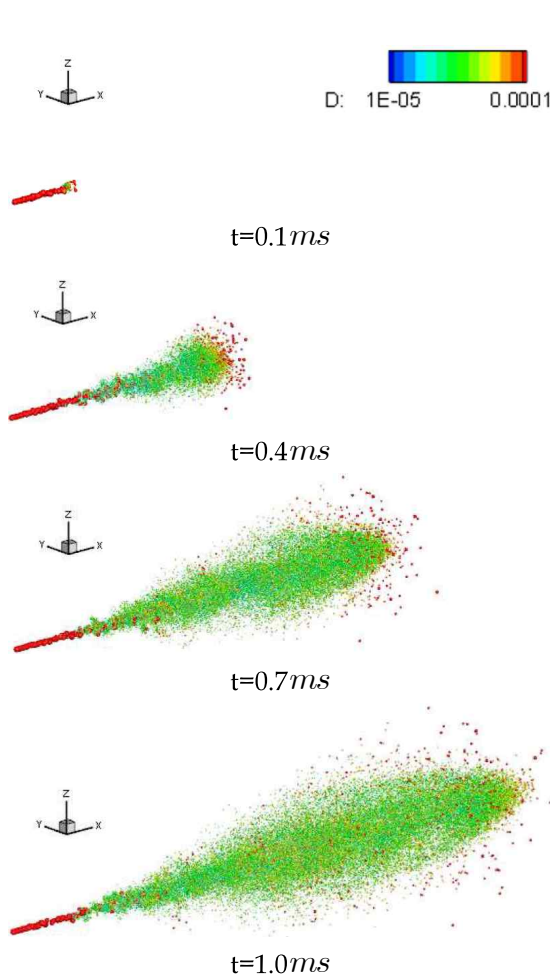


Fig. 2. The breakup and atomization of a jet in parallel flow using Jones et al. model

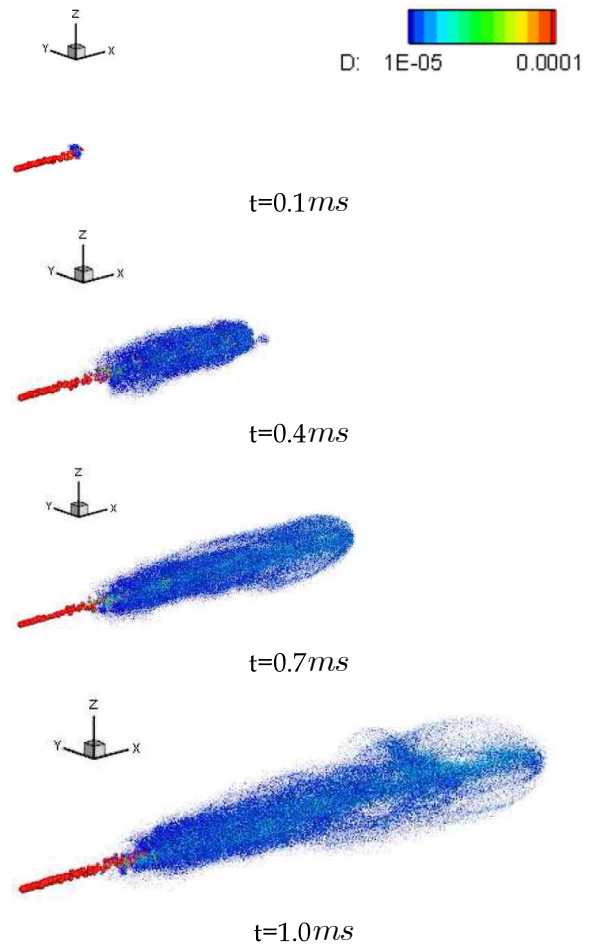


Fig. 3. The breakup and atomization of a jet in parallel flow using Gorokhovski et al. model

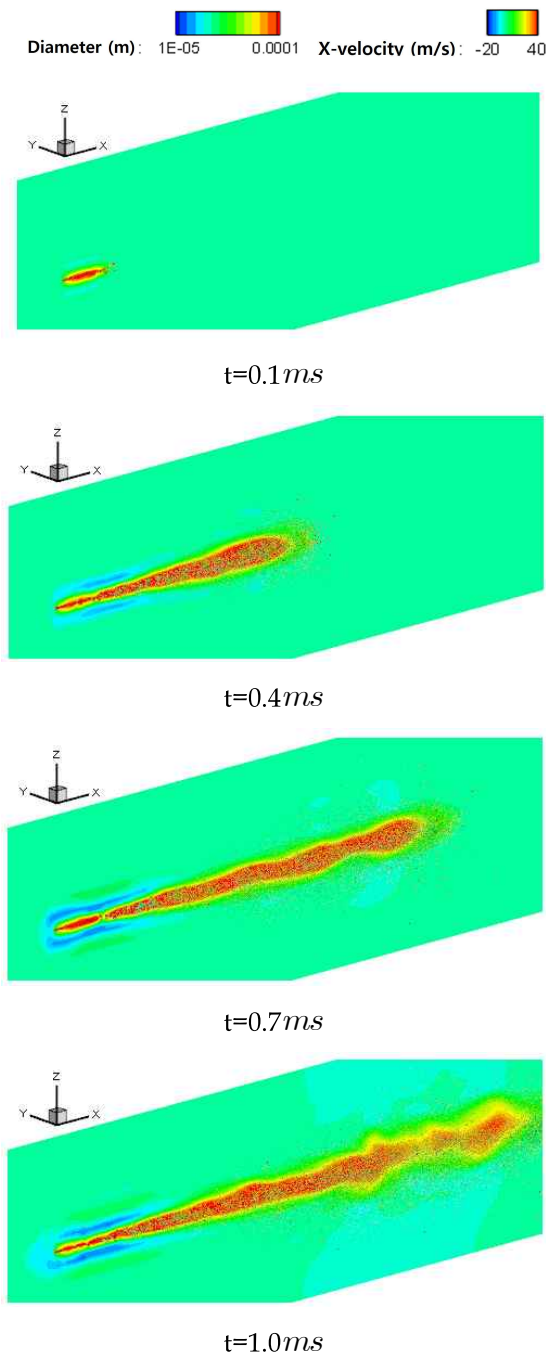


Fig. 4. The breakup and atomization of a jet in parallel flow using Jones et al. model

제트 주위의 유동장(유속)이 변화되는 모습을 나타낸다. 액적의 입자 직경(m)을 표시한 색범례(color legend)는 Figs. 2, 3과 같다. 따라서 그림에서 나타난 제트의 축방향으로 길게 뻗어진 빨강색은 기체의 빠른 유속을 의미하며, 액체 제트의 분사로 인하여 주위 기체 유속이 증가됨을 의미한다. Fig. 6은 평행 분사에서의 침투깊이

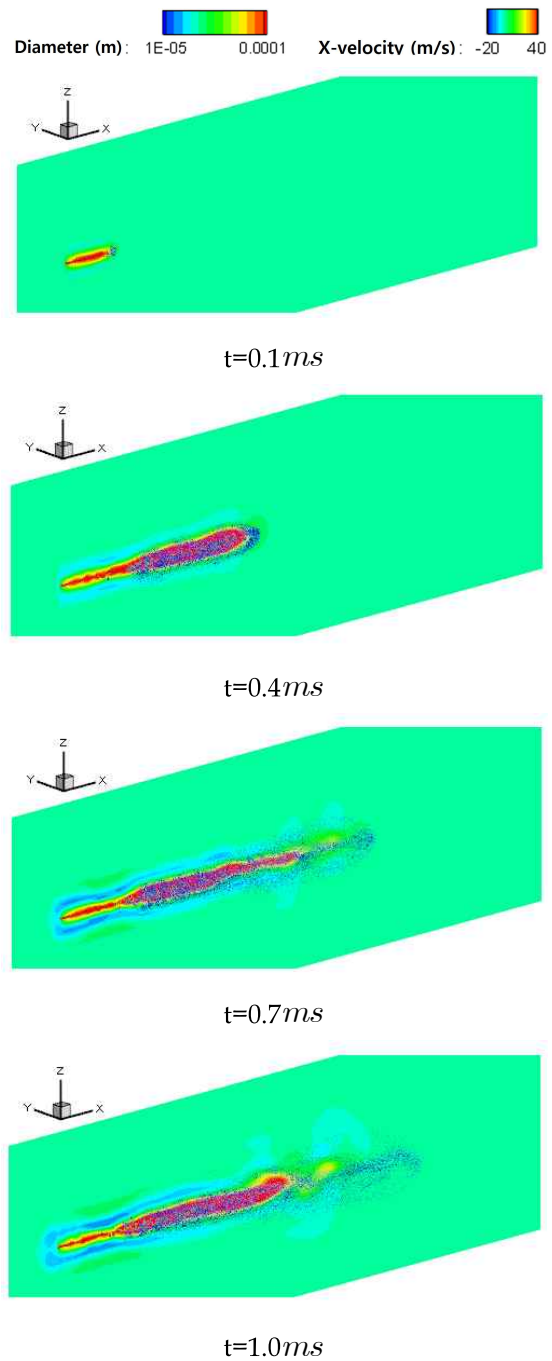


Fig. 5. The breakup and atomization of a jet in parallel flow using Gorokhovski et al. model

결과를 실험값[20]과 비교한 그래프이다. Jones et al. 모델의 결과는 실험값보다 높는데 이는 액적의 분열이 잘 되지 않음에 따라 입자의 관성이 커져서 침투 깊이와 침투 속도가 커졌기 때문이다. 반면에 Gorokhovski et al. 모델은 실험과 침투깊이가 유사하므로 액적의 분열 현상이 실험과 유사함을 의미한다.

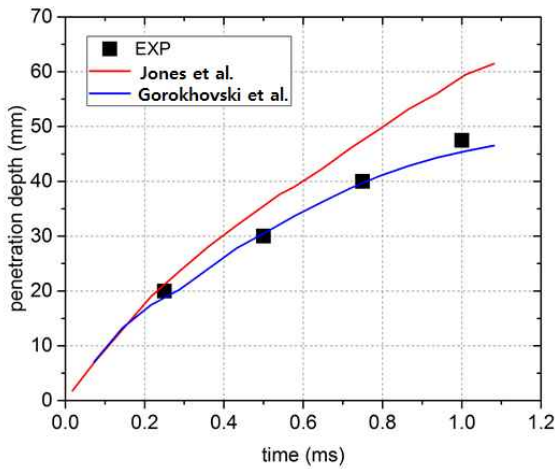
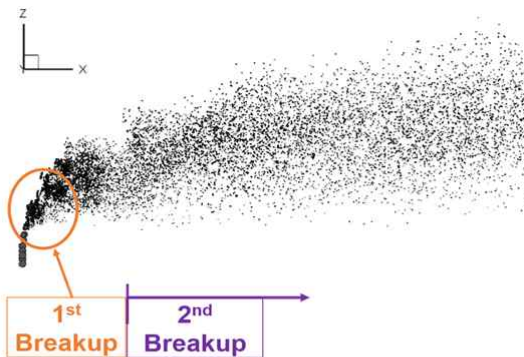


Fig. 6. The penetration depth of a jet in parallel flow

2.3.2 수직 분사

Figure 7은 수평으로 흐르는 유동에 물을 수직으로 분사했을 때에 두가지의 확률론적 분열 모델을 적용한 결과로써 액체 제트가 분열되는

• Jones et al.



• Gorokhovski et al.

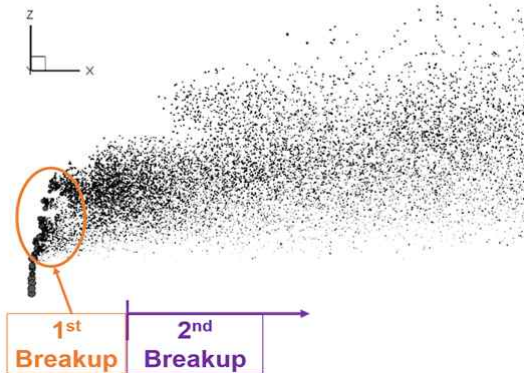


Fig. 7. The breakup and atomization of a jet in cross flow

현상을 스냅샷으로 나타낸 그림이다. 수평으로 흐르는 공기의 유속과 간섭으로 인하여 수직으로 분사되는 액체 제트의 액주가 유동방향으로 휘어지면서 1차 분열 후 더 작은 액적들로 2차 분열되는 것을 알 수 있다. 이를 정량화하기 위하여 침투깊이를 분석하였다. Fig. 8은 수직 분사에서 각 분열모델의 침투깊이 결과를 Stenzler[21], Wu[22], Mashayek[23]의 실험식과 비교한 그래프이다. 침투 깊이가 측면에서는 두 모델 간의 큰 차이를 보이지는 않으나, 침투 깊이가 실험식이 큰 입자를 추적한 것이므로 입자의 분산 (즉 큰 입자 주위에 2차 분열된 작은 입자가 분포되는 현상)을 고려하면 Gorokhovski et al. 모델이 실험 결과와 좀 더 유사하다고 할 수 있다. 또한 Gorokhovski et al. 모델이 Jones et al. 모델보다 침투 깊이가 좀 더 크다는 것은 액적 분열이 적게 일어나는 것을 의미하는데 이는 수평분사와 반대되는 현상이다.

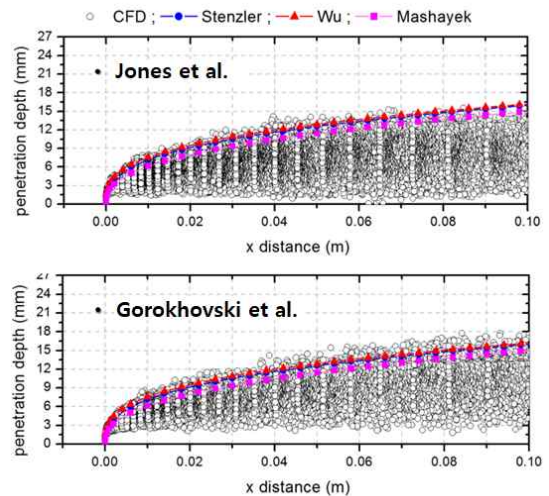


Fig. 8. The penetration depth of a jet in cross flow

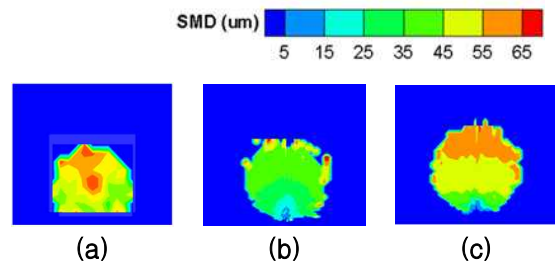


Fig. 9. SMD distribution on the y-z plane at x/d = 100 (a) Stenzler's experimental data (b) Jones et al. model (c) Gorokhovski et al. model

이를 정량적으로 확인하기 위하여 y - z 의 단면의 시간 평균된 SMD를 실험결과와 비교하였다. (Fig. 9) Jones et al. 모델이 더 빠르게 분열되어 입도가 Gorokhovski et al. 모델과 실험결과 보다 더 작음을 알 수 있다. Jones et al. 모델은 입도 분포가 전반적으로 매우 작고 고르게 분포된 반면에 Gorokhovski et al. 모델은 실험과 좀 더 유사하다. 그러나 수평 분사와 수직 분사에서 두 모델의 분열 결과가 다르게 나타나는 결과는 앞으로 더 연구되어야 할 부분이다.

III. 결 론

두 가지 확률론적 분열 모델을 3차원 LES 수치해석에 적용하여 평행분사와 수직분사의 침투 깊이와 SMD 등을 조사하였다. 액체 제트의 활발한 분열은 전반적으로 실험결과와 매우 유사하게 수치적 모사가 가능함을 제시하였다.

평행분사에서는 Jones et al. 모델보다 Gorokhovski et al. 모델에서 분열이 더 잘 일어났으며, 활발한 분열은 액적의 관성이 작아짐으로 인해 침투깊이 또한 낮아졌다. 이러한 현상은 Gorokhovski et al. 의 분열 모델이 Jones et al. 분열 모델보다 더 실험결과와 유사하였다.

수직분사에서의 액적 분열 강도는 Jones et al. 모델보다 Gorokhovski et al. 모델의 경우가 더 작았으며, 이에 따라 Gorokhovski et al. 모델의 침투깊이와 SMD가 Jones et al. 모델의 경우보다 더 컸다. 특히 수직분사에서의 액체 제트의 침투깊이는 수평분사의 경우와는 달리 두 모델 (Jones et al. 모델과 Gorokhovski et al. 모델) 모두 실험결과와 유사하였지만, SMD의 분포 측면에서는 즉 2차 분열된 액적의 입도 크기와 입도 분포에 있어서 Gorokhovski et al. 모델이 실험과 더욱 유사하였다.

본 연구를 통하여 확률론적 분열모델이 미세한 입자로 분열되는 액체제트의 분열 모델에 적용 가능함을 알 수 있었다. 그렇지만 수평 분사와 수직 분사에서 두 모델의 분열입도 결과가 다르게 나타나는 현상은 앞으로 더 연구되어야 할 부분이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)과 산업통상자원부 주관 항공우주부품 기술개발 사업(10050539), 그리고 방위사업청 국방과학연구소 기초연구사업(2016-05-044)의 지원에 의해 수행 되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) O'Rourke, P. J., and Amsden, A. A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE Technical Paper 872089, 1987.
- 2) Ibrahim, E. A., Yang, H. Q., and Przekwas, A. J., "Modeling of spray droplets deformation and breakup," Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, 1993, pp. 651~654.
- 3) Reitz, R. D., "Modeling Atomization Processes in High-pressure Vaporizing Sprays," Atomisation and Spray Technology (ISSN 0266-3481), Vol. 3, No. 4, 1987, pp. 309~337.
- 4) Beale, J. C., and Reitz, R. D., "Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model," Atomization and sprays, Vol. 9, No. 6, 1999, pp 623~650.
- 5) Prashant. K., Wang. S., Yang. V., "Modeling of finite-size droplets and particles in multiphase flows," Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 28, No. 4, 2015, pp 974~982.
- 6) Yang, S. J., Koo, J. Y., Sung, H. G., and Yang, V., "LES of Breakup and Atomization Characteristics of a Liquid Jet into Cross Turbulent Flow," The Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 14, No. 2, 2010, pp. 1~9.
- 7) Yoo Y. L., Han, D. H., Sung, H. G., "LES on breakup and atomization of a liquid jet into cross turbulent flow in a rectangular duct", The Korean Society of Aeronautical and space sciences, Vol. 44, No. 4, 2016, pp 290~297.
- 8) Apte, S. V., Gorokhovski, M. A., and Moin, P., "LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup," International Journal of Multiphase Flow, Vol. 29, No. 9, 2003, pp. 1503-1522.

- 9) Gorokhovski, M. A., and Saveliev, V. L., "Analyses of Kolmogorov's model of breakup and its application into Lagrangian computation of liquid sprays under air-blast atomization," *Physics of Fluids*, Vo. 15, No. 1, 2003, pp. 184-192.
- 10) Vinkovic, I., Aguirre, C., Simoens S., and Gorokhovski, M., "Large Eddy Simulation of Droplet Dispersion for Inhomogeneous Turbulent Wall Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 32, 2006, pp.344-364
- 11) Gorokhovski, M. A., and Saveliev, V. L., "Statistical universalities in fragmentation under scaling symmetry with a constant frequency of fragmentation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41, No. 8, 2008, 085405.
- 12) Gorokhovski, M. A., Jouanguy, J., and Chtab-Desportes, A., "Stochastic model of the near-to-injector spray formation assisted by a high-speed coaxial gas jet," *Fluid dynamics research*, Vol. 41, No. 3, 2009, 035509.
- 13) Bini, M., and Jones, W. P., "Particle acceleration in turbulent flows: A class of nonlinear stochastic models for intermittency," *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 3, 2007, 035104.
- 14) Bini, M. and Jones W. P., "Large-Eddy Simulation of Particle-Laden Turbulent Flows," *J. Fluid Mech.* 614, 2008, pp.207-252
- 15) Bini, M., Jones, W. P., and Lettieri. C., "Large eddy simulation of spray atomization with stochastic modelling of breakup." *Proceedings of the European Combustion Meeting*, Vol. 22, No. 11, 2009.
- 16) Jones, W. P., and Lettieri, C., "Large eddy simulation of spray atomization with stochastic modeling of breakup," *Physics of Fluids*, Vol. 22, No. 11, 2010, 115106.
- 17) Jones, W. P., Marquis, A. J., and Noh. D., "A stochastic modelling for LES of a two-phase combusting flow," 7th European Combustion Meeting, 2015.
- 18) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W. H., "A Dynamic Sub-scale Eddy Viscosity Model," *Physics of Fluids* 3, 1991, pp.1760-1765
- 19) Young-Lin, Y. et al. "A large eddy simulation of the breakup and atomization of a liquid jet into a cross turbulent flow at various spray conditions." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 112, 2017, pp. 97-112.
- 20) Hiroyasu, M., Kadota, T., "Fuel droplet size distribution in diesel combustion chamber," *SAE Tec. Paper* 74071, 1974.
- 21) Stenzler, J. N., and Lee, J. G., "Penetration of liquid jets in a crossflow," *AIAA* 2003-1327, 2003.
- 22) 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, 1997, pp. 545-552.
- 23) Mashayek, A., "Experimental and numerical study of liquid jets in crossflow," *Master's Dissertation*, Toronto University, 2006.