

Lagrangian-Eulerian 기법을 이용한 고압 디젤 분무 시뮬레이션의 수치해석격자 의존성 저감에 관한 연구

김 사 열¹⁾ · 오 윤 중²⁾ · 박 성 욱³⁾ · 이 창 식^{*3)}

조지아공과대학교 항공과¹⁾ · 한양대학교 대학원 기계공학과²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Reduction of a Numerical Grid Dependency in High-pressure Diesel Injection Simulation Using the Lagrangian-Eulerian CFD Method

Sayop Kim¹⁾ · Yun Jung Oh²⁾ · Sung Wook Park³⁾ · Chang Sik Lee^{*3)}

¹⁾School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, GA 30332-0150, USA

²⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 6 September 2010 / Revised 17 May 2011 / Accepted 30 July 2011)

Abstract : In the standard CFD code, Lagrangian-Eulerian method is very popular to simulate the liquid spray penetrating into gaseous phase. Though this method can give a simple solution and low computational cost, it have been reported that the Lagrangian spray models have numerical grid dependency, resulting in serious numerical errors. Many researches have shown the grid dependency arise from two sources. The first is due to unaccurate prediction of the droplet-gas relative velocity, and the second is that the probability of binary droplet collision is dependent on the grid resolution. In order to solve the grid dependency problem, the improved spray models are implemented in the KIVA-3V code in this study. For reducing the errors in predicting the relative velocity, the momentum gain from the gaseous phase to liquid particles were resolved according to the gas-jet theory. In addition, the advanced algorithm of the droplet collision modeling which surmounts the grid dependency problem was applied. Then, in order to validate the improved spray model, the computation is compared to the experimental results. By simultaneously regarding the momentum coupling and the droplet collision modeling, successful reduction of the numerical grid dependency could be accomplished in the simulation of the high-pressure injection diesel spray.

Key words : Lagrangian-Eulerian(Lagrangian-Eulerian 기법), Grid dependency(격자 의존성), Droplet collision(액적 충돌), High-pressure diesel injection(고압 디젤 분무), KIVA-3V code(KIVA-3V 코드)

1. 서 론

최근의 디젤 엔진 설계의 최적화 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 실험적 접근에 의한 설계 인자 확보와 더불어, 개발 비용 절감을 위한 해석 기술의 개발에 큰 관심이 모아지고 있다.^{1,2)}

특히, 디젤 엔진 연소실 내 분무 형성 과정은 물리

적으로 상당히 복잡한 메커니즘을 수반하게 되며, 특히 다상 유동 현상을 효율적으로 예측하기 위해 수많은 물리적 가정들이 수립되어야 한다. 이러한 관점에서, 대부분의 수치해석 코드들이 액체 연료들의 미립화 및 거시적 분포 거동을 해석하기 위한 방법으로, Lagrangian-Eulerian 기법을 적용한다.³⁾ 즉, 주변 기체 유동장에 대해 Euler 관점에서 수송 방정식을 풀고, 분무 입자들은 Lagrange 관점으로 추

*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

적하여 거동을 해석한다. 그리고 두 상(Phase)간의 운동량 및 에너지의 전달은 오일러 상(Eulerian phase)의 수송 방정식의 소스항(Source term)에 의해 반영된다.

그러나, 최근의 많은 연구 결과들에 따르면, 이 방법에 근거한 예측 결과는 수치 격자의 크기 따른 의존성이 크게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Beard 등⁴⁾은 기존의 방법에서 분무 소스항의 운동량 교환량 및 증기 전달량을 액적과 계산 격자점과의 거리 등을 고려하여 새롭게 수정해주는 방법을 제안한 바가 있다. 하지만 이 방법은 본 연구팀의 사전 평가에 의하면 여전히 계산 격자에 의존하는 특성을 가지는 것으로 결론지어졌다.

한편, Abani 등⁵⁾은 Gas-jet 모델을 제안함으로써 새로운 격자 의존성 저감 대책을 내놓은 바가 있다. 본 연구에서는 예측 기술의 정확성 확보와 계산 효율성 증대를 위해, 분무 수치해석 코드의 격자 의존성에 대하여 이론적으로 분석하고, 동시에 Gas-jet 모델 및 기타의 분무 모델들을 새롭게 적용하여 격자 의존성 저감 성능에 대한 평가를 수립하고 정량적인 비교 분석 내용을 설명한다. 이를 바탕으로 디젤 엔진 분무 시뮬레이션의 예측 정확성을 확보하기 위한 대책을 제시한다.

2. 분무 해석 기법 및 격자 비의존성 모델

2.1 Lagrangian-Eulerian 기법

본 연구에 사용된 KIVA 코드에서는 기체 유동장 및 분무 입자의 거동을 각각 Euler 및 Lagrange 관점으로 푼다.³⁾ 먼저, 기체 유동장을 풀기 위하여 다음의 연속 방정식 및 운동량 보존 방정식을 푼다.

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho_g dV = \int_V \dot{\rho}^{spray} dV \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \int_V \rho_g \mathbf{u} dV &= \int_S p \mathbf{n} \cdot d\mathbf{A} + \int_S \boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{A} \\ &+ \int_S \mathbf{F}^{spray} \cdot dV + \int_S \rho_g \mathbf{g} \cdot d\mathbf{A} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 확인할 수 있는 바와 같이 우변 항에 분무 거동에 의한 질량 변화 및 운동량 변화를 반

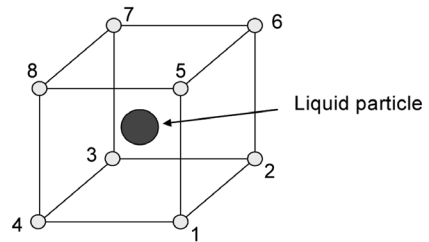


Fig. 1 Computational grid cell and liquid particle in Lagrangian-Eulerian method

영하는 소스항이 추가 되어 있다. 식 (1)의 우변은 연료 액적의 증발에 따른 주변 기체 유동장내 질량 변화량을, 식 (3)의 우변 세번째 항은 고속의 분무 액적의 존재로 인한 주변 기체 유동장의 운동량 증가를 나타낸다. 한편, 위의 식으로부터 계산 격자의 각 노드(node)에서 기체 유동장의 각 상태량이 결정되며, Fig. 1에 보이는 바와 같이 계산 셀(cell)의 체적에 해당하는 기체의 양과 해당 셀 내에 분포하고 있는 분무 입자간의 질량 전달 및 운동량 전달량이 수송방정식의 소스항에 반영된다. 이렇게 전달된 상태량은 셀에 등질적으로 분포하는 것으로 가정한다.

한편, 등질적 상태 전달량 분포 가정에 의하여 격자 의존성이 발생하게 된다. 즉, 분무 입자가 존재하는 셀의 체적에 해당하는 상태량에 대하여 소스항을 계산하기 때문에 계산 격자의 크기에 따라 상대적으로 전달된 상태량의 효과가 과하거나 부족할 가능성이 발생하게 된다. 이러한 격자 의존성의 결과로, 분무 해석에서의 분무 발달 길이가 격자의 크기에 따라 크게 의존되는 결과가 보고되고 있다.

2.2 절 격자 비의존성 분무 모델

2.2.1 가스제트(Gas-jet)모델

Abani 등⁴⁾은 분무 해석에서의 격자의 크기에 따른 분무 발달 길이의 의존성을 해결하기 위한 가스제트 모델을 제안한 바가 있다. 기존의 코드들은 분무 입자와 주변 유동장간의 상대속도를 계산함에 있어 식 (1)과 (2)에 의하여 결정되어진 식에 의하여 결정된다. 이 때, 기체 유동장의 검사체적으로 전달된 액적의 운동량은 기체의 속도 및 검사질량으로 결정되고, 검사질량은 격자 해상도에 따라 변하게 되므로 결국 기체의 속도는 격자 해상도에 크게 의존하게 된다.

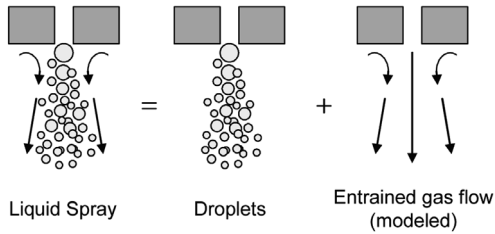


Fig. 2 Schematics of gas-jet model⁴⁾

이러한 문제를 해결하기 위하여 가스젯 모델에서는 gas-jet 이론을 적용하여 식 (3)과 같이 주변 공기 유동장의 속도를 해석 격자와 무관하게 결정하였다. 즉, 이미 모델링된 기체 속도를 액적의 공기 역학 모델에 사용함으로써 격자의 크기에 비의존한 상대속도를 구할 수 있게 되고, 이는 분무 발달 길이의 격자 비의존성의 결과로 나타날 수 있다.

$$U_{axis} = \min \left[U_{inj}, \frac{3U_{inj}^2 d_{eq}^2}{32v_t x} \right] \quad (3)$$

$$\left(1 + \frac{3U_{inj}^2 d_{eq}^2 r^2}{256v_t^2 x^2} \right)^2$$

여기서 U_{inj} 는 연료의 분사 속도이고, d_{eq} 는 $d_{noz} \sqrt{\rho_l / \rho_g}$ 에 해당하는 값으로 결정된다.

2.2.2 격자 비의존적 충돌 알고리즘

기존의 액적 충돌 모델인 O'Rourke⁶⁾의 모델은 통계적 기법에 근거한 모델로써, 분무 입경 크기 예측 결과가 격자 크기에 의존적인 것으로 확인되고 있다. 특히, 두 개의 액적이 충돌할 수 있는 조건을 하나의 격자 셀내에 존재한다는 가정으로부터 액적의 충돌 확률이 격자 해상도에 의존하게 된다. 특히, 격자의 크기가 커질 수록 흡착의 확률이 높게 나타나는 것으로 보고 되고 있다.¹⁰⁾

이러한 문제를 해결하기 위하여 Nordin⁷⁾은 결정적 접근법(Deterministic approach)에 근거하여 실제 액적들의 공간적 분포 및 속도의 벡터 분석에 의하여 액적간 충돌 확률을 결정하였다. 즉, 두 액적간 충돌은 다음의 식 (4)와 (5)에서 표현하는 바와 같이 두 액적의 진행 방향과 공간적 근접성에 근거하여 결정된다. 이러한 방법은 격자의 기하학적 특성을 반영하지 않고 오로지 액적의 거동 방향만을 고려하기 때문에 격자의 크기에 의존하지 않는다.

$$\overline{u_{12}} = (\overline{u_2} - \overline{u_1}) \cdot \frac{(\overline{p_2} - \overline{p_1})}{|\overline{p_2} - \overline{p_1}|} < 0 \quad (4)$$

$$|\overline{u_{12}}| \Delta t > |\overline{p_2} - \overline{p_1}| - (r_1 + r_2) \quad (5)$$

한편, 공간상에 분포하는 액적의 밀도를 고려하여 Munnannur와 Reitz⁸⁾는 각각의 액적에 대하여 충돌 가능 반경(Radius of Influence)를 정의하였고, 두 액적의 충돌 가능 반경이 식 (4) 및 (5)에 의하여 서로 인접하였을 때 충돌이 발생하는 것으로 가정한다.

3. 계산 적용 조건

본 연구에서는 기존의 해석 코드의 격자 의존성을 분석하고 Gas-jet 모델 및 Nordin의 개선된 충돌 모델이 적용된 결과들을 평가하기 위하여 Table 1에서 보이는 바와 같이 고압 디젤 분무의 조건을 계산에 적용하였다. KIVA-3V 코드를 사용하였고, 격자 의존성 분석을 위하여 다양한 격자 해상도를 적용하였고 적용된 계산 격자 크기는 $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$, $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$, $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$, $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$ 의 네 가지이다.

Table 1 Test condition for high-pressure diesel injection⁹⁾

Fuel	Diesel fuel
Ambient gas	Nitrogen
Fuel temperature [K]	313
Injection duration [ms]	3
Nozzle diameter [μm]	257
Ambient pressure [kPa]	977 and 1,981
Injection pressure [MPa]	137

4. 결과

4.1 기존의 해석 코드에 의한 결과

Fig. 3과 Fig. 4의 결과는 기존의 해석 코드에 의한 해석 결과의 격자 의존성을 나타낸 것이다. 격자의 분포가 조밀해질수록 분무 발달 길이가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 분무 입자가 주변 공기 유동장에 전달하는 운동량은 입자가 포함된 셀의 체적단위로 결정되므로 격자가 작을수록 더 많은 운동량을 얻게 되고, 이는 주변 유동장의 속도가 급격히 빨라지게 됨을 의미한다. 결국, 해당 셀의 속도

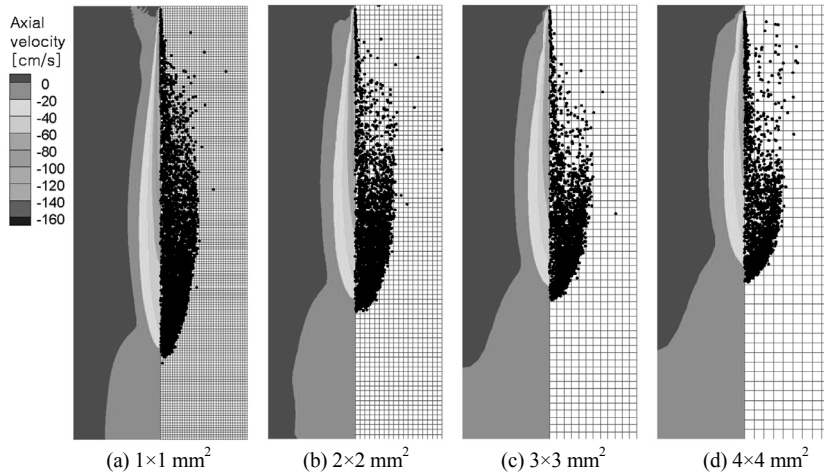


Fig. 3 Effect of grid resolutions on the gaseous axial velocity (left) and spray behavior (right) using standard method

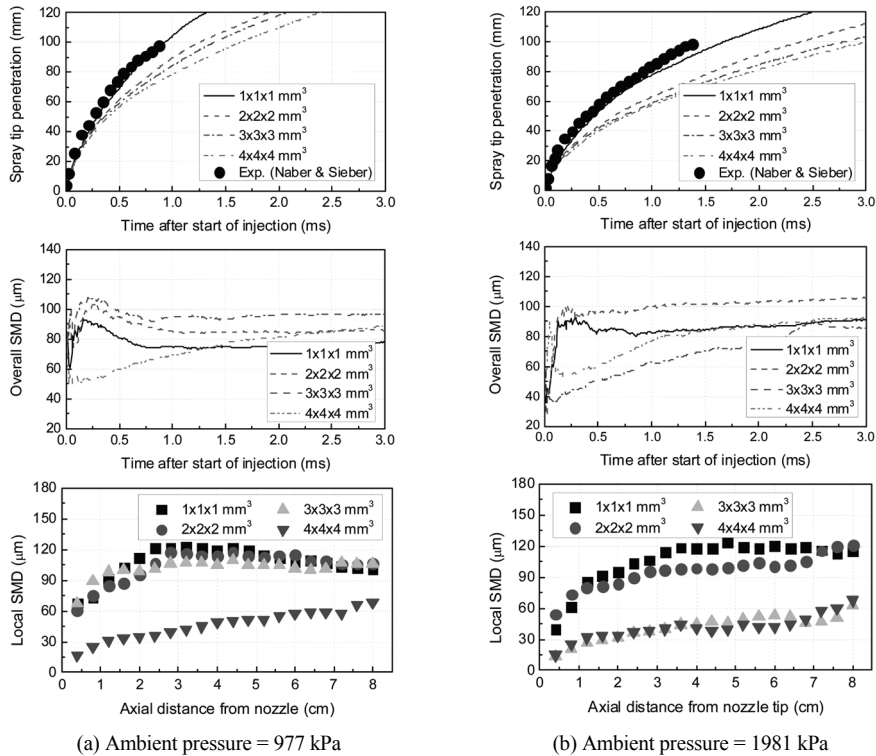


Fig. 4 Effect of grid resolutions on spray tip penetration and droplet mean size

상대량이 빨라짐으로 인해 다음 차례에 도착하는 입자는 상대적으로 낮은 상대속도를 경험하게 되고, 이는 결국 운동량 전달이 줄어드는 것을 의미한다. 이러한 반복적 과정에 의해 전체적인 분무의 길이는 길어지게 되는 것이다. 또한 상대속도의 양이

격자의 크기에 결정됨으로써 평균 입경 크기의 분포 또한 격자에 크게 의존적인 것을 확인할 수 있다. 또한 O'Rourke의 충돌 모델의 영향으로 전체 액적 크기(Overall SMD)의 시간적 분포가 지나치게 증가하는 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4.2 개선된 분무 모델의 적용

Fig. 5와 Fig. 6은 가스제트(Gas-jet)모델 및 격자 비의존성 액적 충돌 알고리즘을 적용한 코드를 이용한 시뮬레이션 결과들이다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 가스제트 모델의 적용으로 인해 분무

발달 길이가 격자 해상도 조건에 관계없이 거의 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 가스제트 모델의 적용으로 인해 주변 공기 유동장이 격자 조건과 무관하게 결정됨으로써 액적이 받는 공기역학적 항력이 정확하게 예측되었기 때문이다.

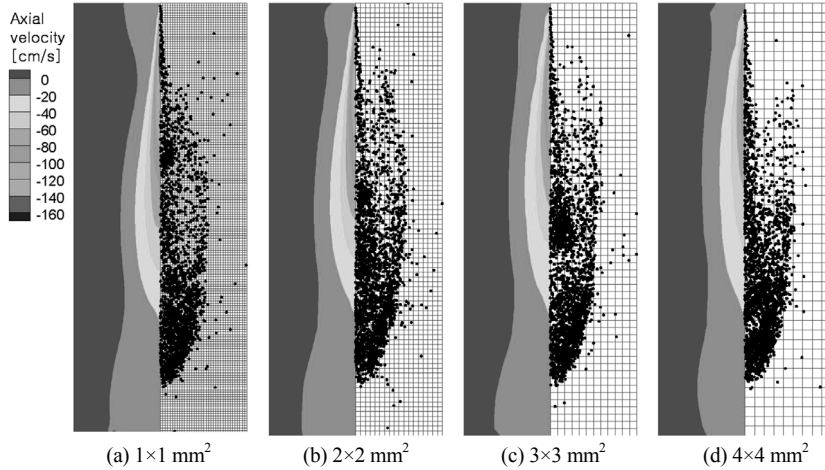


Fig. 5 Effect of grid resolutions on the gaseous axial velocity (left) and spray behavior (right) using standard method

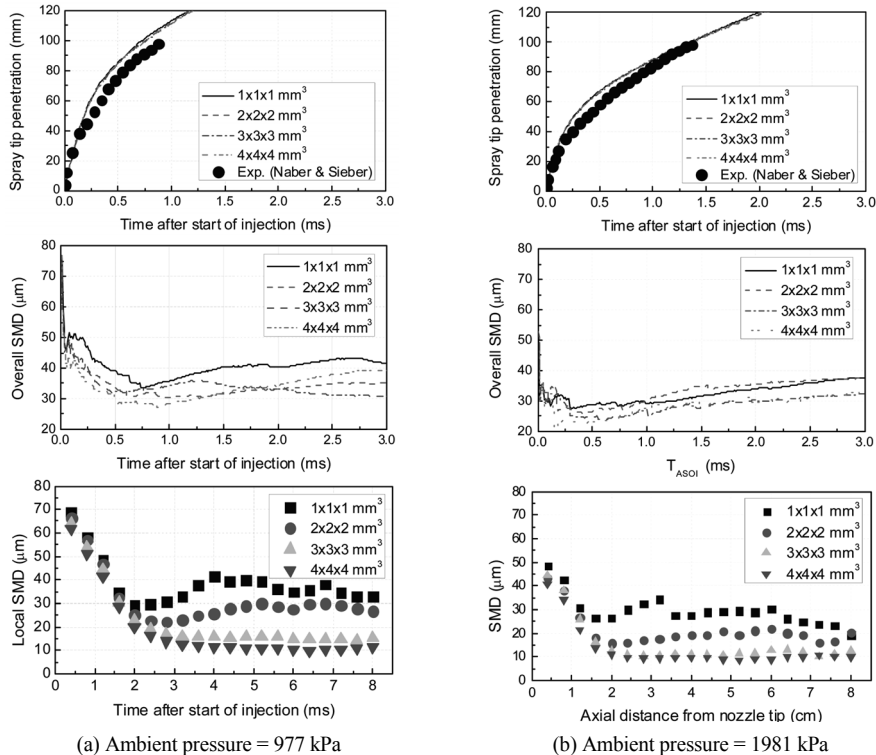


Fig. 6 Effect of grid resolutions on spray tip penetration and droplet mean size

한편, 계산시간에 따른 전체 액적 크기의 평균값은 기존의 코드에 비해 개선된 경향을 보이고 있다. 하지만, 여전히 입경의 예측에서는 격자 조건에 따른 의존성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 가스제트 모델의 경우 액적이 받는 항력을 결정하기 위한 공기 유동장만을 결정하고, 액적이 주변 유동장에 미치는 영향은 기존의 기법을 따르기 때문이다. 다시말해, 식 (1)과 (2)에서 적용되는 소스항이 그대로 적용되기 때문에 주변 유동장이 받는 상태량의 변화는 여전히 격자에 의존적이다. 이러한 영향은 축방향에 따른 SMD 분포값에서도 여전히 확인할 수 있다. 액적 분열 모델에서 계산되는 상대속도의 값은 주변 공기 유동장의 속도에 근거하기 때문에 액적 분열 성능에 영향을 미치기 마련이기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 분무 해석에 적용 가능한 격자 비의존적 분무 모델을 수치적으로 분석하고 예측 정확성을 평가하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기존의 라그랑지-오일러 기법의 적용시 두 상간의 운동량 전달량이 격자의 크기에 의존하여, 주변 공기 유동장 속도 예측의 부정확성으로 인한 분무의 발달 길이 및 분무 입경 크기 분포에 큰 영향을 나타내게 된다.
- 2) 가스제트 모델의 적용시, 주변 공기의 유동 속도가 격자의 크기와 무관하게 결정되므로, 액적이 받는 공기역학적 항력을 격자의 분포에 영향을 받지 않고 정확하게 결정할 수 있다. 이로 인해 격자 크기에 따른 분무 발달 길이의 영향이 완벽하게 저감되었다.
- 3) 가스제트 모델은 액적이 받는 항력의 영향만을 고려하였을 뿐, 여전히 주변 유동장의 속도는 기존의 기법을 이용하므로 액적 분열시 상대속도의 값은 여전히 격자에 의존적인 경향을 나타내었다. 따라서 액적의 주변 유동장으로의 운동량 전달을 정확히 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요하다.
- 4) O'Rourke의 충돌 모델은 격자에 크기에 따라 액

적의 크기를 매우 크게 예측하는데 반해, Nordin의 충돌 모델을 이용하여 격자에 비의존적인 충돌 확률을 결정할 수 있다. 그 이유는 이 모델에서 격자의 기하학적 조건을 고려하지 않는 충돌 확률 결정법을 채택하고 있기 때문이다.

후 기

본 연구는 2단계 두뇌한국 21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원해 주신 기관에 감사드립니다.

References

- 1) S. Kim, Y. T. Seo and C. S. Lee, "Prediction of Non-evaporating Diesel Spray by Hybrid Breakup Models," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp.483-488, 2007.
- 2) D. P. Schmidt, and P. K. Senecal, "Improving the Numerical Accuracy of Spray Simulations," SAE 2002-01-1113, 2002.
- 3) A. A. Amsden, "KIVA-3V: A Block Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," Los Alamos National Laboratory Technical Report, No. LA-13313-MS, 1997.
- 4) P. Beard, J.-M. Duclos, C. Habchi, G. Bruneaux, K. Mokaddem and T. Baritaud, "Extension of Lagrangian-Eulerian Spray Modeling: Application to High Pressure Evaporating Diesel Sprays," SAE 2006-01-3335, 2006.
- 5) N. Abani, S. Kokjohn, S. W. Park, M. Bergin, A. Munnannur, W. Ning, Y. Sun and R. D. Reitz, "An Improved Spray Model for Reducing Numerical Parameter Dependencies in Diesel Engine CFD Simulations," SAE 2008-01-0970, 2008.
- 6) P. J. O'Rourke, Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays, Ph.D. Dissertation, Princeton University, New Jersey, USA, 1981.
- 7) N. Nordin, Complex Chemistry Modeling of Diesel Spray Combustion, Ph.D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2001.
- 8) A. Munnannur and R. D. Reitz, "A New Predictive Model for Fragmenting and Non-

- fragmenting Binary Droplet Collisions,” Int. J. Multiphase Flow, Vol.33, pp.873-896, 2007.
- 9) J. D. Naber and D. L. Siebers, “Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays,” SAE 960034, 1996.
- 10) S. Kim, D. J. Lee and C. S. Lee, “Modeling of Droplet Collisions for Application to Inter-impingement Sprays,” Int. J. Multiphase Flow, Vol.35, pp.533-649, 2009.