

액상부탄연료의 분무특성에 관한 수치해석

김성대* · 이성욱† · 동윤희* · 김산해* · 이영철* · 조용석**

A Numerical Analysis for the Spray Characteristics of Liquefied n-butane fuel

S. D. Kim, S. W. Lee, Y. H. Dong, S. H. Kim, Y. C. Lee and Y. S. Cho

Key Words: 정적연소기, 전산유체역학, 액화석유가스, 분무특성

Abstract

This research investigated spray characteristics using LPG fuel under compression ignition to contribute to develop a high efficiency LPG fuel is an environmentally-friendly fuel since it emits lower CO₂ compare to other conventional fuels. In order to observe spray process, a high speed digital camera and high pressure common-rail injector were applied. Using the spray behaviors of LPG and diesel fuel from the experiment, this research analyzed the mixing process of air-fuel mixture numerically with FLUENT 6.3 when LPG and diesel fuel injected directly into the cylinder while compression stroke occurs. Spray characteristics of LPG fuel was investigated by using numerical method, in which KH-RT model was adapted for phase change. As a result of numerical analysis, this work found out that LPG spray has a wider mixing formation and uniform diffusion of air-fuel mixture compare to diesel.

1. 서 론

현재 내연기관의 주 연료로 사용되어 온 가솔린과 경유는 급격한 사용량 증가에 의한 대기오염 및 지구 온난화 문제의 심각성과 매장량의 한계에 대한 문제점을 야기해 왔다. 이에 대한 방안이 다방면으로 연구되고 있으며, 현재 대체 에너지원의 개발과 청정에너지에 대한 관심 고조로 인해 저공해 자동차에 대한 가능한 대안으로 LPG 연료가 대체연료로써 차지하는 비율이 높아질 것으로 보고되고 있다.

LPG는 청정연료로써 PM과 SO₂의 배출이 거의 없고, 디젤 차량에 비해 CO₂의 배출이 10% 정도 적은 것으

로 알려져 있다⁽¹⁾. 그러나 기존 LPG 차량은 디젤 차량에 비해 낮은 출력과 연비의 악화되는 것이 단점으로 지적되고 있다. 하지만 LPG연료는 가격 면에서 디젤연료에 비해 상대적으로 값이 싸고, 상온 및 저압에서 비교적 쉽게 액상으로 저장 가능하므로 시장에서의 대체 가스연료 중 하나인 LNG에 비해 충진이 용이하다는 장점이 있다. LPG를 실린더 내에 액상으로 직접 분사하는 경우 흡입 공기량 및 공연비의 정밀 제어가 가능하고 연료의 기화 잠열에 의한 연소실 냉각 효과 등으로 출력 및 연비 향상과 유해 배출가스의 저감을 도모할 수 있다⁽²⁾. 또한 LPG는 낮은 분자량과 높은 증기압을 가지므로 균일한 연료공기 혼합기를 기대할 수 있다. 이와 같이 액상 LPG 직접 분사방식(LPDi)은 기화기 방식 및 흡기관 분사방식에 비해 성능 향상 효과가 기대되지만 상용디젤 차량의 자기착화 방식을 실현하기 위해서는 해결해야 할 문제가 많다.

정적연소기를 통해 고압 압축분사(25 MPa)하여 분무현상을 관찰하여 분무특성을 얻고자 연구를 진행하

(2009년 8월 19일 접수 ~ 2009년 8월 29일 심사완료)

*국민대학교 자동차공학전대학원

**국민대학교 기계자동차공학부

†책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

E-mail : energy@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4819 FAX : (02)910-4718

였다. 또한 분무 실험을 통해 얻은 데이터를 이용해서 액상 LPG연료와 디젤연료를 압축행정 시 연소실 내에서 직접 분사 했을 때의 물성치가 다른 두 연료에 상변화 과정을 수치해석하여 엔진 개발 지원을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

압축착화방식 액상 LPG 직접분사 기관의 분무 현상을 가시화하기 위하여 실제 중소형 디젤기관과 유사한 조건으로 보어 86.2 mm, 폭 39 mm인 정적연소기를 제작하였다. 정적연소기 주변에 고속 디지털 카메라와 조명을 설치하여 연료의 분무거동의 확산 형상을 실사 촬영하였다. 또한 정적연소기 주변장치로 흡배기밸브, 압력센서, 스파크 플러그를 장착하였고, 실사 촬영을 위해 양측에 직경 120 mm, 두께 25 mm의 강화유리를 설치하여 가시화 할 수 있게 하였다. 4개의 카트리지 히터를 정적연소기 벽면에 설치하여 벽면 온도를 100°C로 유지하였다. 연소기 내부 잔류 가스는 진공펌프와 감압탱크를 이용하여 제거하였으며 공압펌프와 커먼레일 장치를 이용하여 25 MPa로 연료를 가압 할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 실험 장치 조건은 Table 1에 나타내었고, 실험기기의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

Bore × Stroke	86.2 mm × 39 mm
Displacement	228 cm ³
Fuel Delivery	Direct injection
Injection pressure	25 MPa
Injection duration	1.9~2.5 ms

2.2 실험방법

정적연소기 내에서 고압 25 MPa로 액상 LPG 연료와 diesel 연료를 분사하였다. 분무 실험의 경우 분위기 압이 $P_{amb} = 0.0 \sim 3.0$ MPa인 다양한 조건에서 분무 발달 과정을 관찰하였다. 일반적으로 LPG는 iso-부탄과 n-부탄, 프로판의 혼합물로서 계절별, 지역별로 그 조성이 다르나, 본 실험에서는 100% 부탄을 사용하였다⁽⁴⁾.

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델

수치해석에 있어서 공기 유동, 확산의 비정상상태와 연료의 상변화 해석을 위한 상용 프로그램인 FLUENT 6.3를 사용하였다. 실제 압축비가 18:1인 디젤 기관의 연소실을 CATIA V5로 모델링 하였으며, 격자는 FLUENT 6.3에 내장되어 있는 Gambit을 이용해 생성하였다. 연소실 전체를 모델링하였는데 이는 압축착화기관에서

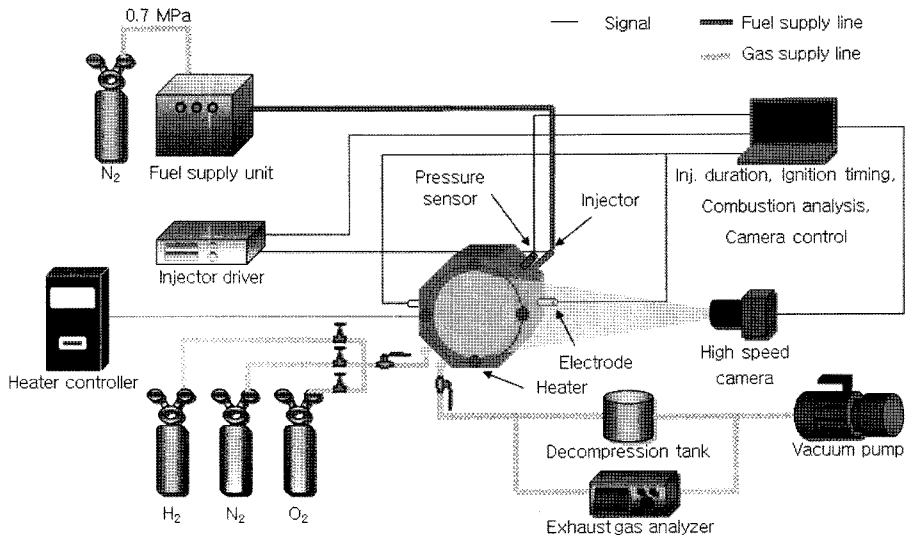


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

발생하는 난류 특성인 swirl을 고려하기 위해서이다. 격자의 개수는 연소실 내에서 피스톤이 상사점 부근에 있을 때 약 2만8천개이며 흡기밸브가 닫혔을 시점에는 약 29만개로 격자를 생성하였다. 난류 유동의 특성을 분석하기 위하여 레이놀즈 방정식과 난류 모델을 적용하였고, 또한 연료의 상변화를 하기 위해 secondary breakup까지 고려 할 수 있는 KH-RT model을 사용하여 액적이 breakup 되는 현상을 고려되었다. 다음은 본 계산에서 사용된 대표적인 방정식을 나타내고 있다³⁾.

- 난류운동량이 고려된 레이놀즈 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + U_j \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (1)$$

- Breakup length(Levich's correlation);

$$L_B = C_L \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} D_0 \quad (2)$$

- Breakup time;

$$\gamma = \frac{3.726 B_1 a}{\Lambda \Omega} \quad (3)$$

- The drop acceleration is computed from the drag coefficient;

$$a = \frac{3}{8} C_D \frac{\rho_g U_r^2}{\rho_l r} \quad (4)$$

Table 2 은 수치해석에 사용한 연소실 제원을 나타내었다. Tables 3~4에 나타낸 조건을 이용하여 수치 계산을 행하였다.

KH-RT model 상수(B0, B1, C_levich, C_tau, C_3) 적용에 앞서 각 상수들의 특성을 파악하였으며, n-butane 과 diesel 연료의 KH-RT 상수를 적용하기 위해 분위기 압력에 따른 분무 실험결과를 이용 하였다. 연소실 내에 분사 위치 및 분사각은 현재 중소형 디젤기관에 적용되고 있는 Bosch Euro-4 인젝터의 연료 분사 위치 및 분사각을 수치해석에 적용하였다. 또한 분사기간과 분사량은 예비분사실험을 통해 얻은 데이터를 이용하였다.

Table 2 Engine condition of numerical analysis

Bore [mm]	86.2
Stroke [mm]	92.4
Engine speed [rpm]	1500
Compression ratio	18 : 1
Injector	Bosch Euro-4
Modeling	Combustion chamber(all)

Table 3 Numerical analysis condition

Parameter	Values
Solver	Unsteady
Solution	PISO
Turbulence	RNG k-ε
Drop breakup and atomization	KH-RT model (Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor)
Injection-type	Solid-cone
Material	n-butane(liquid), diesel(liquid)
Diameter distribution	Uniform
Aerodynamic drag	Dynamic-drag coefficient
Conversation equation	Second order upwind
Time stepping	Corresponds to 0.25 degree of crank angle

Table 4 Injection formation

Parameters	Values
Injection type	Solid-cone
Number of particle stream	1000 (2stream)
Particle type	Droplet
Material	n-butane (liquid), diesel (liquid)
Diameter distribution	Uniform
Cone angle [deg]	10° (cone half angle)

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

4.1.1 분무 가시화 실험결과

분무실험을 통해 정적연소기 내에서의 액상 LPG와 diesel 분무형태를 비교 촬영하였다. 촬영은 분사시작 시점을 기준으로 분류가 벽면에 도달할 때까지의 시간 순서대로 비교하여, 분사압 25 MPa, 분위기 압력 P_{amb} = 0.0~3.0 MPa (gauge)로 분위기 압력에 따른 것을 나타내었다.

분무 실험을 통해 정적연소기 내에서의 액상 LPG 연료와 diesel 연료의 분무 형태를 Figs. 2~3에 나타내었다.

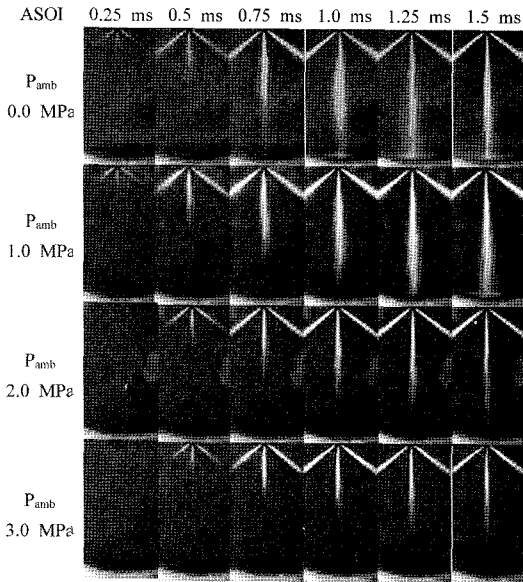


Fig. 2 Spray visualization of LPG with various ambient pressure

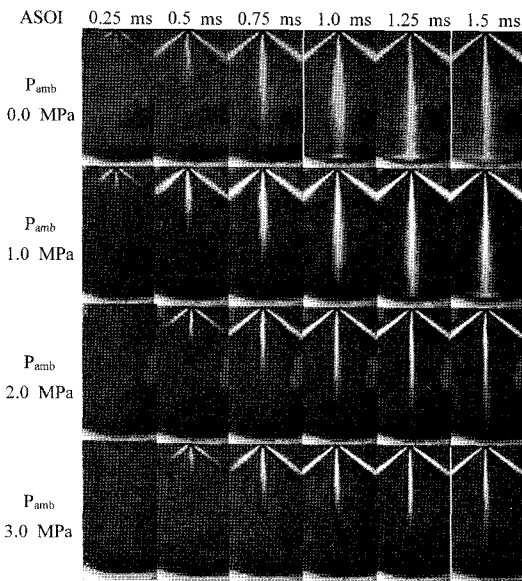


Fig. 3 Spray visualization of diesel with various ambient pressure

대기압에서의 액상 LPG 및 diesel 분류는 벽면에 충돌 할 만큼 충분한 관통력을 가지고 있었다. 또한 분위기 압력이 상승함에 따라 두 연료 모두 관통거리 및 분무각이 줄어들음을 확인 할 수 있었다.

4.1 수치해석결과

4.2.1 n-butane & diesel 분무 수치해석 결과

흡기밸브가 닫힌 시점을 시작으로 압축과정 후 연료를 분무하는 방법으로 수치해석을 진행하였다. FLUENT 6.3에서 지원되는 dynamic mesh를 이용해서 피스톤의 왕복 움직임을 고려하였으며, 액적이 분열 되어 기상으로 상변화 하는 과정이 가능하도록 KH-RT model을 사용하였다^(5,6). 엔진 motoring 시의 압력 선도를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 또한 연료분사시간을 달리하였는데, 이는 두 연료의 발열량이 다르기 때문에 동일한 발열량을 기준으로 연료 분사를 하기 위해서이다. 예비 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 연료분사시간을 n-butane 연료는 1.5 ms, diesel 연료는 1.1 ms로 수치해석에 적용하였다. Fig. 4는 실제 motoring 결과와 시뮬레이션 비교 결과를 나타내고 있다.

실험 motoring 결과, 압축 말기 압력이 4.4 MPa이었지만 수치해석 결과는 약 0.6 MPa 높은 결과가 나왔다. 이는 연소실 내부에 열전달 및 피스톤 상하 왕복운동으로 인해 발생하는 마찰 손실이 고려되지 않았기 때문이라고 판단된다.

Figures 5-6은 압축착화기관의 연소실에 n-butane 연료와 diesel 연료의 분무 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과, 분무 실험 결과와 같이 연소실 내부 고온고압으로 인해 n-butane 연료와 diesel 연료의 관통거리가 짧아지고 분무각이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 연소실 내에서 두 연료를 분사해 본 결과, n-butane 연료가 diesel 연료에 비해서 관통거리는 짧았으나 연료가 분사된 후 빠르게 기화되면서 연소실

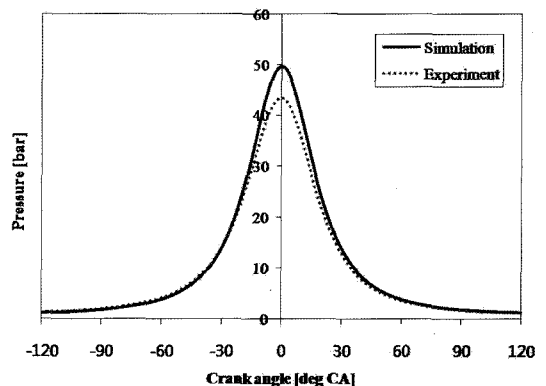


Fig. 4 The comparison of simulation and experiment motoring data

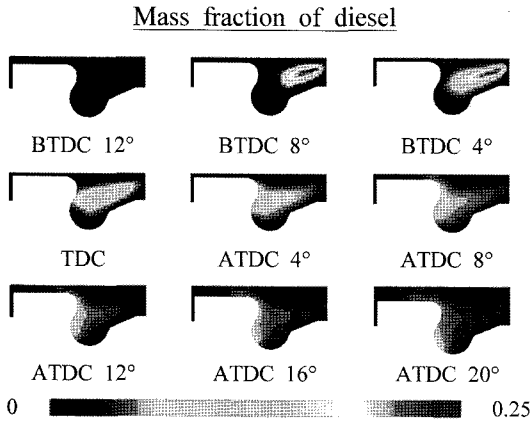


Fig. 5 Spray simulation of diesel in combustion chamber

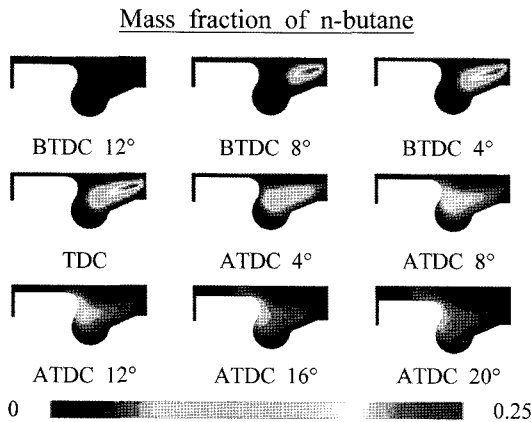


Fig. 6 Spray simulation of n-butane in combustion chamber

내에서 신속한 확산이 이루어진다는 것을 확인 할 수 있었다. 반면, diesel 연료는 피스톤 bowl면에 국부적으로 연료가 농후하게 분포한다는 사실도 확인 할 수 있었다. 이는 연소 후 배출가스에 많은 영향을 미칠 것이라고 판단되어진다.

4.2.1 분사각도에 따른 liquefied n-butane 분무 수치 해석 결과

LPG연료의 가장 많은 조성을 차지하고 있는 n-butane 연료를 이용하여 분사각에 따른 연소실 내에서의 유동특성을 파악하고자 하였다.

낮은 분자구조식을 가지고 있는 n-butane은 압축착화 방식에 적용 시 짧은 관통거리와 빠른 기화 특성을 가지고 있다는 것을 파악하였고, 또한 짧은 관통거리를 가졌지만 연소실 내에서의 유동특성으로 인해 충분히

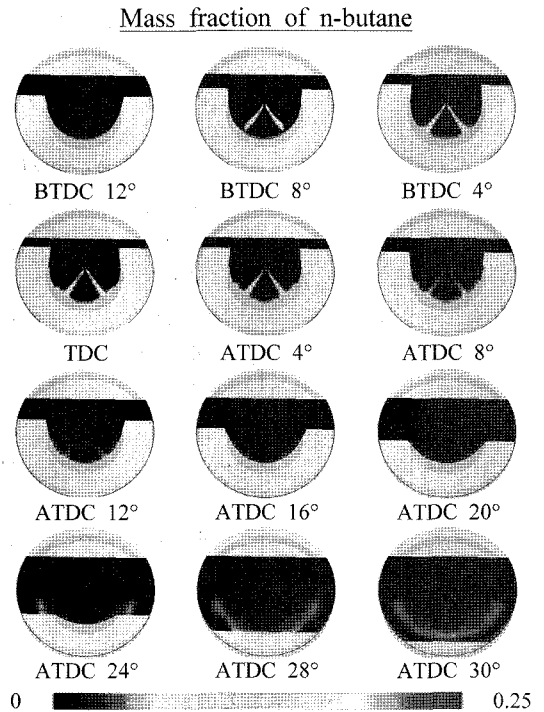


Fig. 7 7hole(spray angle 72°) spray simulation of n-butane in combustion chamber. (2 stream)

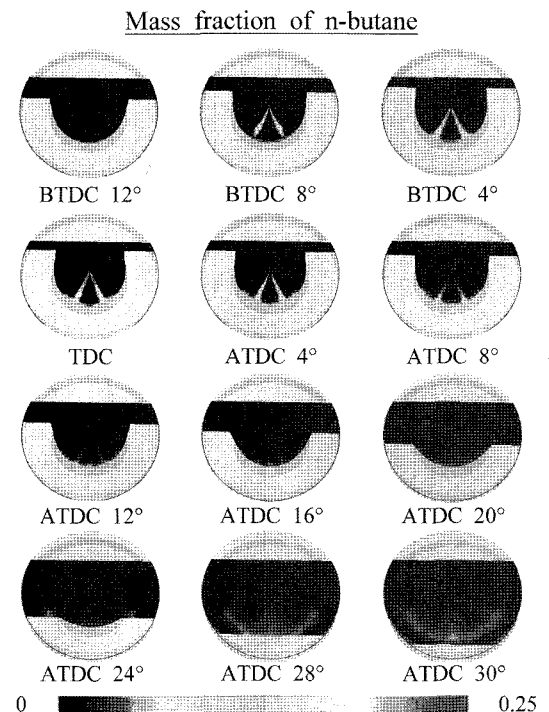


Fig. 8 7hole(spray angle 51.42°) spray simulation of n-butane in combustion chamber (2 stream)

신속한 확산이 이루어짐을 파악하였다. Fig. 7~8는 분사각도에 따른 액상 n-butane 연료 분사 시 연소실 내에서의 유동특성을 나타내었다. 연료가 piston bowl로 분사되는 각을 기준으로 나타내었다.

5 hole 분사(분사각도 72°) 시와 7 hole 분사(분사각도 51.42°) 시물레이션 결과, 두 경우 모두 n-butane 연료의 빠른 기화 특성으로 인해 분사 된 연료가 연소실 내에서 고른 분포를 나타내었다. 특히 7 hole 분사 시 연소실 내에서 분사 된 연료가 연소실 중심과 하단에서 연료 분포가 겹쳐지는 현상을 파악하였다. 반면에 5 hole 분사 시 연소실 내에서의 연료 분포는 겹쳐지는 현상이 파악되지 않고 고른 분포를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 n-butane 연료 분사 시 분사 노즐 개수 선택에 있어 현 중소형 디젤기관에 적용되고 있는 노즐 개수에 비해 적은 노즐개수 적용이 가능하다고 판단되어진다.

5. 결 론

압축착화방식 액상 LPG 연료의 분무특성에 대한 정적연소기 실험 및 시물레이션을 통해 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 분위기 압력 변화에 따른 분무 실험 결과, 관통거리는 디젤연료에 비해 짧았으나 분무각은 디젤연료에 비해 커짐을 알 수 있었으며 두 연료 모두 분위기 압력이 증가 할수록 관통거리와 분무각이 줄어들음을 확인하였다.

2. 압축행정 시 연소실 내에서의 분무 시물레이션 결과, 디젤연료와 비교하여 관통거리는 짧았으나 연소실 내에서 국부적으로 연료가 국부적으로 농후하게 존재하지 않고, 고른 확산이 이루어지는 것을 확인 할 수

있었다.

3. 분사각도에 따른 분무 시물레이션 결과, 압축착화기관에 n-butane 연료 적용 시 분사 노즐 개수 선택에 있어 현 중소형 디젤기관에 적용되고 있는 노즐의 분공 수에 비해 적은 노즐의 분공 수 적용이 가능하다고 판단되어진다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원 “중소형, LPG 상용차 개발사업”으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Y. C. Han, D. J. Kim, “Internal Combustion Engine”, pp.179~203, pp.259~262, 1998.
- (2) K. W. Jung, “An Experimental Study on Un-Regulated Matter in Heavy-Duty Diesel Engine with EGR”, Master’s thesis, Kookmin University, pp.8~9, 1999.
- (3) CFD-FLUENT ver 6.3 manual “Chap. 23 Modeling Discrete Phase”.
- (4) S. Turns, “An introduction to combustion”, p. 543, McGraw-Hill, Inc., 1996.
- (5) CFD-FLUENT ver 6.3 manual “Chap. 11 Modeling Flows Using Sliding and Deforming Meshes”.
- (6) Winfried Waidmann, Andreas Boemer, Markus Braun, “Adjustment and Verification of Model Parameter for Diesel Injection CFD Simulation”, SAE, 2006-01-0241, 2006.