

정적챔버내 연료분무의 수치해석적 연구

양두한[†]·박형구^{*}

Numerical Analyses of Fuel Sprays in a Constant Volume Chamber

Du-Han Yang, Hyung-Koo Park

Key Words: Constant Volume Chamber(정적 챔버), Breakup Model(분열 모델), Diesel Spray(디젤 분무), Spray Tip Penetration(분무선단 거리), Spray Tip Velocity(분무선단 속도), STAR-CD,

Abstract

This study aimed to analyze spray characteristics and the ambient flow field in the mixture preparation state of the premixed combustion stage. It is very important to understand the spray characteristics and the fuel injection conditions in direct injection diesel engine because the emission gas compositions from diesel engines are related to spray formation processes of the premixed combustion stage. The numerical simulation was performed using the STAR-CD which is a commercial CFD code. Computed results of the transient high pressure diesel spray were compared with experimental results of the same spray injection condition in the constant volume chamber. The results show that spray patterns of numerical simulation agree with this experimental results comparatively.

1. 서 론

디젤엔진은 점화시스템이 없어 엔진구조가 간단하여 내구성이 좋은 장점과 가솔린 엔진에 비하여 높은 열효율을 가지고 있다. 이러한 디젤엔진의 강점으로 인하여 최근엔 디젤엔진을 장착한 승용차들이 급속히 개발되고 있다. 이미 유럽과 미국등지에서는 디젤엔진 승용차의 비율이 빠르게 증가하고 있는 추세이고 우리나라 역시 디젤엔진승용차의 양산과 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 디젤엔진에 있어 가장 큰 문제점중의

하나는 가솔린 엔진에 비해 상대적으로 많은 질소산화물(NO_x)과 매연등의 유해배출가스가 발생한다는 것이다. 이들의 저감은 최근에 엄격해진 배출가스 규제정책과 맞물려 가장 큰 관심의 대상이 되고 있다. 이와 같은 유해배출가스를 줄이기 위한 노력으로 연료분무의 미립화 특성에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 디젤엔진은 연소실내로 연소행정이 진행되기 직전 연료분무가 분사되어 공급되고 공기와 충분히 혼합되기 전에 연소가 시작되며 공연비가 매우 불균일하게 된다. 따라서 배기가스는 분사되는 연료가 미립화가 진행되는 과정에 공기와의 혼합이 매우 중요한 요인으로 작용하고 이러한 이유로 연료분무의 미립화에 관한 연구는 필수적이라고 하겠다.

최근에 이르러 연료분무에 관한 많은 연구들이 실험과 전산해석을 병행하고 있으며 컴퓨터 성능의 급속한 발달로 수치해석의 비중이 점차 증가하는 추세이다. 전산해석은 시간과 경제적인 면

[†] 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

E-mail : univy94@hanmail.net

TEL : (062)530-0078 FAX : (062)530-1689

^{*} 정회원, 전남대학교 기계시스템공학부

에서 많은 장점을 가지고 있지만 명확한 이론적인 모델들이 개발되지 않고서는 신뢰성에 있어 결함을 갖고 있는 것이 현실이다.

지금까지 수많은 분무의 미립화 모델들이 개발되었다. 대표적으로 액적의 진동과 찌그러짐을 Talyor 상사이론으로 적용된 모델들이 O'Rourke와 Amsden⁽¹⁾, 그리고 다른 연구자들에 의해 개발되었고 디젤분무의 해석에 이용되고 있다. 또한 Reitz와 Diwakar⁽²⁾도 Weber수의 범위에 따라 분열 모델을 선택적으로 적용할수 있는 분무모델을 개발하였고 이를 KIVA코드에 적용하여 연구하였다.

본 연구에서는 디젤기관의 연소단계 중 예혼합 연소기간 이전단계인 혼합기 형성과정에서 분무 성장 및 유동장 대해서 연구하였다. 디젤엔진의 배출가스 성분은 예혼합 연소기간 이전 혼합기의 형성과정에 따라 큰 영향을 받기 때문에 분무특성과 연료의 분사조건과의 관계를 이해하는 것은 매우 중요하다. 비 증발 조건에서 정적연소기로 고압으로 분사되는 분무의 전산해석과정은 상용 유동해석 프로그램인 STAR-CD를 이용하였다. 분위기 압력, 분위기성분, 그리고 분사압력 등 분사조건을 달리하여 각 조건에 대한 결과를 수치해석결과에 대하여 기존의 실험결과⁽³⁾와 비교하고 그 결과를 고찰하였다. 정적챔버에 분사되는 분무의 수치해석조건은 실제엔진의 분사조건에 비하여 단순화하였다.

2. 지배방정식

2.1 기상의 지배방정식

연속적인 기상의 기본적인 보존 방정식은 Eulerian좌표계로 나타낸다. 연속상의 Euler 형 지배방정식은 다음과 같이 일반좌표계(ξ) 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \phi_c + \frac{\partial}{\partial \xi_i} (\rho_c u_{c,j} \phi_c) - \frac{\partial}{\partial \xi_i} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi_c}{\partial \xi_i})) = S_{\phi,c} + S_{\phi,d} \quad (1)$$

여기서 $S_{\phi,c}$ 는 단상유동 자체에서의 일반화된 생성항이며, $S_{\phi,d}$ 는 연속상과 분산상간의 상호작용에 의한 생성항을 나타낸다.

또한 고압축성유동에 대한 난류모델은 표준 고 레이놀드수 $k-\epsilon$ 모델을 사용한다.

2.2 액상의 지배방정식

일반적으로 분산상의 모션은 연속상의 모션에 의해서 영향을 받지만 분산상과 연속상의 운동량, 질량, 그리고 열전달 효과의 상호작용에 의해서 영향을 받는다. 이러한 상호작용의 세기는 분산된 입자의 크기나 밀도 그리고 그것의 수밀도에 의하여 좌우된다. 난류 유동에 노출된 입자는 변동하는 난류의 속도장에 의해서 무질서한 경로를 따르게 된다. 이러한 분산상의 운동량방정식은 다음과 같다.

$$m_d \frac{d\bar{u}_d}{dt} = \bar{F}_{dr} + \bar{F}_p + \bar{F}_b \quad (2)$$

여기서, \bar{F}_{dr} 은 액적의 항력이다. 액적의 항력을 나타내는 식은

$$\bar{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho A_d |\bar{u} - \bar{u}_d| (\bar{u} - \bar{u}_d) \quad (3)$$

여기서, C_d 는 drag coefficient이고 A_d 는 액적의 단면적이다. \bar{F}_p 는 압력항이고 \bar{F}_b 는 체적력항을 나타낸다.

2.2.1 액적의 분열(breakup)모델

본 연구에 사용된 이론적인 분무의 분열모델로서 Reitz 와 Diwaker의 breakup 모델은 다음 그림과 같이 두가지 형태의 분열영역, 즉 주머니 형태(Bag breakup)와 줄무늬 형태(Stripping breakup) 분할영역에서의 경험적 상관관계식을 이용한다.

(1) Bag breakup

액적주위의 비균일 압력장이 액적을 저압후류의 영역을 확장시키며 팽창하게 되고 결국 표면장력보다 더 커지면 분열하게 된다. Bag breakup의 불안정성은 웨버수(We)에 의해 결정되며 다음과 같은 상관관계를 가진다.

$$We = \frac{\rho |\bar{u} - \bar{u}_d|^2 D_d}{2\sigma_d} \geq C_{b1}, C_{b1} = 6.0 \quad (4)$$

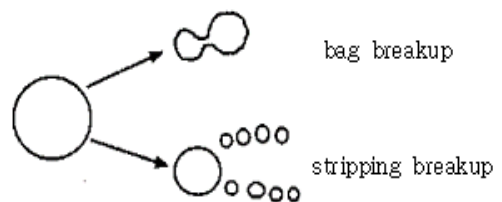


Fig. 1 Reitz and Diwakar Breakup model

Table 1 Computation conditions

Nozzle type	solid con type
Hole diameter	0.168[mm]
Fuel	n-Heptane
Injection amount	8.02[mg/ms]
Injection duration[T_{inj}]	1.0, 1.11, 1.34[msec]
Injection pressure[P_{inj}]	76, 111, 137[MPa]
Ambient temperature[T_{amb}]	298[k]
Ambient composition	CO ₂ , N ₂ , Ne

이때 액적의 수명은 $T_b = \frac{C_{b2}\rho_d^{1/2}D_d^{3/2}}{4\sigma^{1/2}}$ 으로 표현된다.

(2) Stripping breakup

액적표면으로부터 Shear나 Strip force에 의해서 분열하는 웨버수는 다음과 같다.

$$We \geq \sqrt{Re_d} C_{s1} \quad (5)$$

이때의 액적의 수명은 다음 식으로 표현한다.

$$T_b = \frac{C_{s2}}{2} \left(\frac{\rho_d}{\rho} \right)^{1/2} \frac{D_d}{|\bar{u} - \bar{u}_d|} \quad (6)$$

$$C_{s1} = 0.5, C_{s2} = 20$$

여기서 We 는 가스밀도에 기초한 웨버수이고 r 은 액적반경, U 는 gas와 액적사이의 상대속도, σ 는 표면장력이다.

3. 전산해석

3.1 격자생성

해석대상이 될 정적챔버의 형상은 Fig. 2와 같고 실제 내부용적은 약 3.78 l이다. 분무해석을 위해 정적챔버내의 용적을 실측하여 격자전문 생성프로그램인 ICEM-CFD를 이용하여 Fig. 3과 같이 격자를 생성하였다. 격자의 수는 약 20만개 정도이며 격자형태는 육면체(Hexa mesh)이다. 전체 해석영역에서 분무가 이루어지는 공간은 극히 제한된 영역이고 벽면의 영향은 거의 없는 자유분무조건이므로 액적이 분사되는 곳에는 유동의 변화가 심하므로 벽면에 비하여 상대적으로 많은 격자를 집중시켰다.

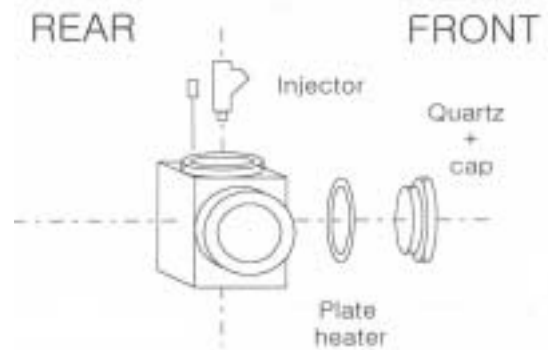


Fig. 2 Schematic of the constant volume chamber

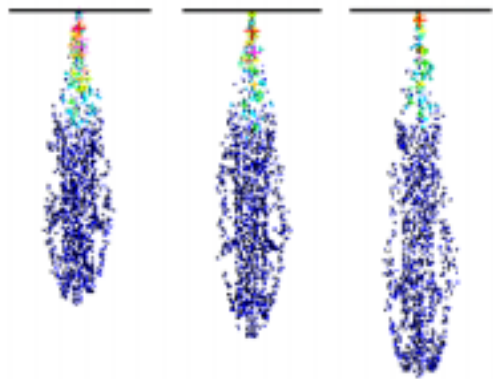


Fig. 3 The computational grid

3.2 해석조건

전산해석의 입력조건은 계산결과와 비교할 실험의 분사조건과 같다. 전산해석에 사용된 조건을 Table 1에 나타내었다. 공통적으로 각각의 해석조건은 비증발 조건을 기준으로 하여 해석된 것이다. 연료조건은 실제 실험조건의 디젤연료와 비교하여 계산의 복잡성 때문에 단일성분의 연료인 n-Heptane을 사용하였다.

정적챔버내로 연료의 고압분사시의 분무거동과 유동장 변화에 관한 수치해석의 조건은 크게 두 가지로 구분하였는데, 하나는 연료의 분사압력 변화, 다른 하나는 분위기의 변화에 따라 나누었다. 분위기의 영향은 다시 분위기 성분, 그리고 분위기 압력조건에 따라 구분하여 해석을 수행하였다. 해석결과에서 계산격자에 의한 차이를 없애기 위해 동일한 격자에서 해석하여 수치해석상의 일관성을 유지하였다.



(a)76MPa (b)111MPa (c)137MPa

Fig. 4 Spray shapes at $T_{inj}=400\mu s$

($P_{amb}=1.42MPa$, $T_{amb}=298K$)

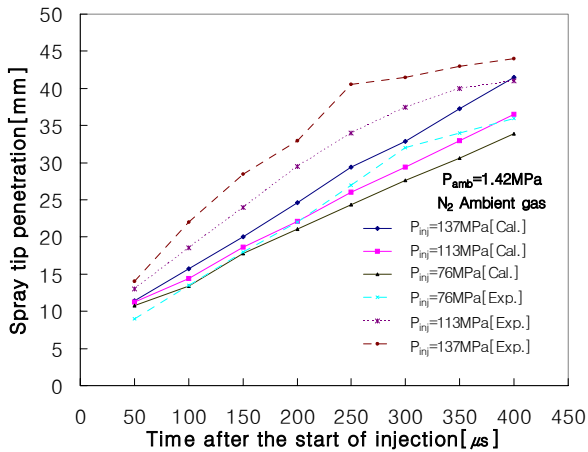


Fig. 5 Spray tip penetration depth for different injection pressures

4. 결과 및 고찰

4.1 분사압력 조건의 영향

분사압력의 변화가 분무의 성장에 영향을 준다는 것은 명확하고 이미 많은 연구^{(4),(5)}가 이루어져 있다. 하지만 분무연구에 있어서 분사압력의 영향은 가장 기본적인 해석 대상이고 이를 통해 본 연구에서 기존의 실험결과와 비교하여 분무의 거시적인 정보를 얻고자 하였다.

Fig. 4는 분사압력 변화에 따른 분무의 형상을 보여주고 있다. 분위기 압력과 온도를 1.42MPa과 298k로 고정하고 분사압력을 각각 76MPa, 111MPa, 137MPa로 달리하였다. 분사압력이 달라지면 분사율이 변하므로 동일한 시각에서 분무선

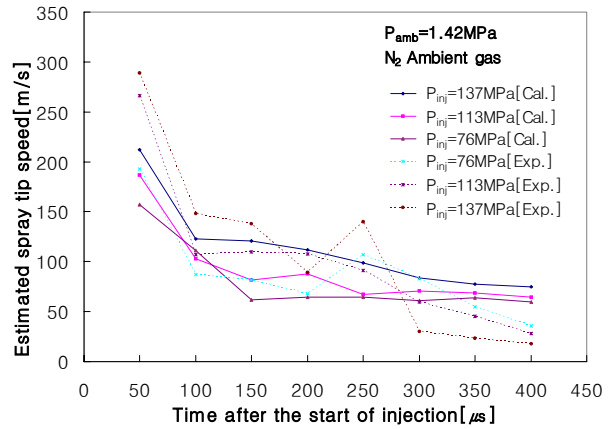


Fig. 6 Spray tip speed for different injection pressures

단거리는 차이가 나게 된다. Fig. 4에서 분사시간이 40 μs 일 때 분무의 형태가 차이가 나는 것은 각기 다른 분사량을 보이기 때문이다. 따라서 분사압력이 달라도 분사량이 동일한 시점에서는 분무형태는 유사하게 될 가능성이 있다.

Fig. 5는 다른 분사압력 하에서 분무선단거리에 대한 실험값과 해석값의 비교결과를 보여준다. 실험과 계산값 모두 동일한 분사시점에서는 분사량의 차이에 의하여 분사압력이 클수록 선단거리 값이 크다는 것을 알 수 있다. 분무구조의 천이 시기는 분무선단거리에서 보면 시간에 선형으로 비례하다가 시간의 제곱근에 비례로 바뀌는 시점을 말한다. Fig.5에서 분무의 천이시점은 실험에 의해서는 대략 250 μs 분사시점에서 보이고 있으나 수치해석결과는 잘 보여주지 못하고 있다. 한편 다른 분사압력으로 분무선단속도를 비교하였을 경우에도 분무선단 속도가 시간에 비례하여 점차 감소하다가 갑자기 증가하는 구간이 있음을 볼 수 있다. 이 시점에서 분무구조의 천이가 일어나고 분무의 운동량을 지배하는 주체가 연료에서 분위기로 바뀌고 있음을 알려준다. Fig. 6에서 분무의 선단속도를 실험과 비교하였다. 실험결과는 250 μs 분사시점에서 분무구조의 천이가 나타나지만 수치해석의 결과는 그보다 빠른 200 μs 분사시점에서 나타났다. 이는 수치해석결과가 실험보다 분무와 분위기사이의 운동량의 교환이 빠르게 진행됨을 알려준다. 분사 압력의 증가는 분무와 분위기 사이의 운동에너지 교환을 크게 만들고 있으며 이러한 현상은 분무의 천이점 사이의 급격한 속도변화를 통해 알 수 있다.

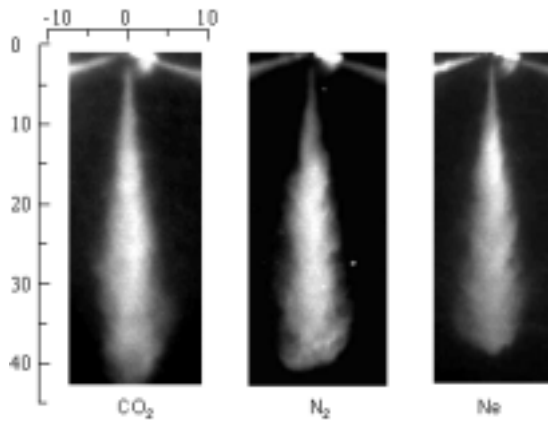


Fig. 7 Effect of ambient composition (Pinj=137MPa at 400µs, Experiment)

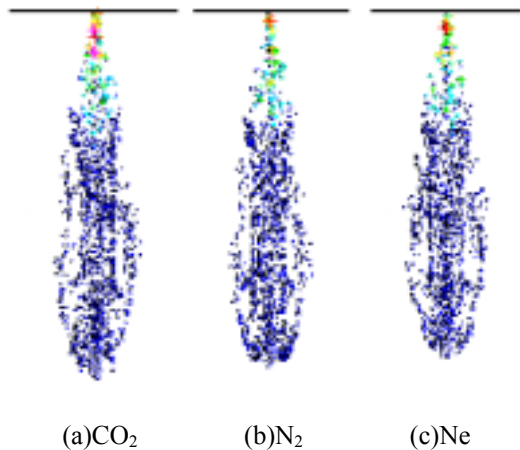


Fig. 8 Effect of ambient composition (Pinj=137MPa at 400µs, Computation)

4.2 분위기 조건의 영향

분무의 성장 및 유동장에 영향을 주는 조건으로써 분위기 조건은 중요한 요소로 작용한다. 먼저 Fig. 7과 Fig. 8에서 분위기 성분에 따라 분무의 형태를 비교하였다. Fig. 7은 실험에 의해 분무를 가시화 한 것으로 분사압력과 분위기 압력이 일정한 경우에 분무성장의 변수로 작용하는 것은 분위기의 점성이다. 분위기의 점성은 N₂를 기준으로 CO₂는 약 0.8배, Ne는 약 1.8배의 점성을 가진다. 따라서 각각의 분위기 성분에 따라 점성의 영향으로 분무의 형태는 달라지게 된다. 실험의 결과는 CO₂의 경우에 점성이 가장 작아서 같은 분사시간(T_{inj}=400µs)에 가장 긴 분무의 선단거리를 나타낸다. Fig. 8에 분위기 점성에 의한 분무형태에 대한 계산결과를 나타내었다.

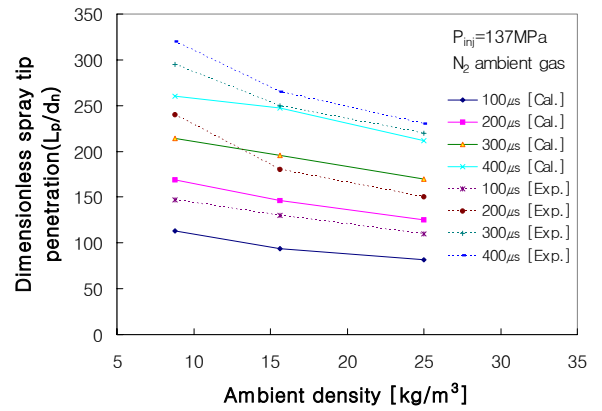


Fig. 9 Dimensionless spray tip penetration for the ambient density

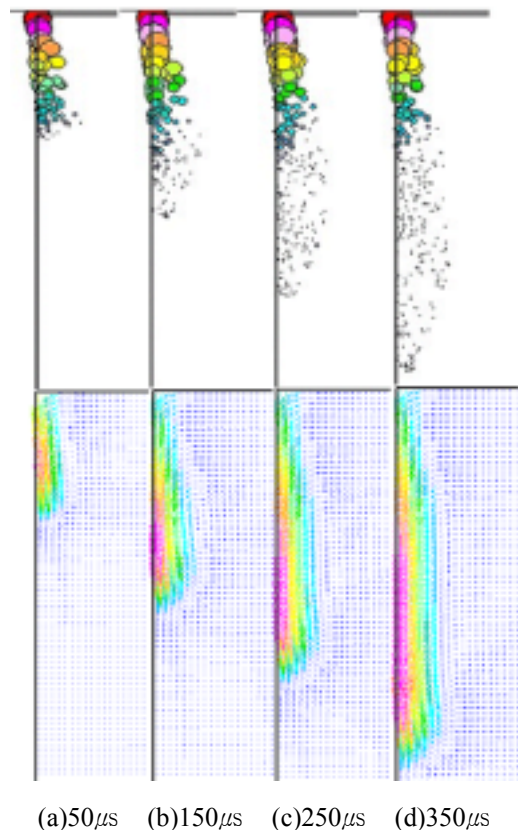


Fig. 10 A spray spread and ambient flows at different times (Pinj=76MPa, Pamb=1.42MPa)

실험과 비교하여 분무형태보다는 분무성장길이에 있어서 유사함을 보여주고 있다. 하지만 계산결과 역시 실험과 마찬가지로 분위기 점성의 효과는 크게 나타나지 못하고 있다. 일반적으로 분사속도가 매우 빠르게 되면 분무 경계면과 분위기

사이에 점성 경계층이 거의 무시되기 때문이다.

Fig. 9에 분위기 밀도에 분무의 선단거리를 분무직경에 대하여 무차원화 시킨 결과를 나타내었다. 점선은 실험값이고 실선은 전산해석에 의한 결과이다. 실험에 의한 결과는 분사시기가 $T_{inj}=200\mu s$ 인 경우에 분위기 밀도에 따른 편차가 급격하게 변함을 알 수 있다. 계산의 의한 결과에 있어서도 실험과 비교하여 분위기 밀도가 높을수록 분무의 선단거리가 작아지는 경향을 보이고 있다.

4.3 분무 주위 유동장 변화

분무주위의 유동장의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 분사압력과 분위기 압력이 76MPa, 1.42MPa 일 때 분사시간에 따른 분무거동과 분무주위의 유동장 변화를 보여준다. 분사기간동안에 분무거동이 분무선단 전면의 분위기를 밀어내고 있음을 나타내고 있다. 분무의 상류와 하류영역 사이에서 분무주위의 와류가 형성되고 있다. 이 와류를 기준으로 분무의 상류 영역에서 분위기가 유입되고 분무의 하류영역에서 밖으로 밀려 나가는 경향을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 정적챔버내에서 고압디젤분사에 대한 연료의 분무특성과 분무주위의 유동장 변화에 대한 전산해석을 수행하였다. 전산해석과 실험결과를 비교하고 분석하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 분사 압력이 증가할수록 분무와 분위기 사이의 운동에너지 교환이 크게 이루어지며 분무구조의 천이점을 전후로 분무의 선단속도 및 관통거리가 급격하게 변한다.
- (2) 분무구조의 분위기 성분의 영향은 분무의 점성에 의한 것으로 기인하지만 효과는 크게 나타내지 못하였다.
- (3) 분위기의 밀도가 증가할수록 항력의 증가로 분무선단거리는 작아진다.
- (4) 분무주위의 유동장에서 분무는 성장하면서 분무상류부분과 측면에서 공기를 유입한다.
- (5) 수치해석결과는 전반적으로 실험결과와 비교하여 정성적으로 유사한 경향을 보였으며 정량적으로 근접한 결과를 얻었다.

참고문헌

- (1) P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, 1987, "The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup," *SAE paper*, No. 872089
- (2) R. D. Reitz and R. Diwakar, 1987, "Structure of High-Pressure Fuel Sprays," *SAE paper*, No. 870598.
- (3) W. Choi, 2003, "Air Flow and Entrainment Characteristic around a Transient High Pressure Diesel Spray," *Ph. D. Thesis* of Chonnam. Univ.
- (4) K. Park, 1997, "Numerical Analysis of the Effect of Injection Pressure Variation on Spray Characteristics," *KSCFE Journal*, Vol. 2, pp. 89~96
- (5) H. C. Yang, Y. T. Jeong, Y. K. Choi, H. S. Ryou, "Numerical Simulations of the Injection Pressure Effect on the Flow Fields and the Spray Characteristics in Direct Injection Engine," 1993, *KSME Journal*, Vol. 17, pp.2339~2358
- (6) Computational Dynamics Ltd., 1999, "STAR-CD User's Manual," Version 3.10
- (7) C. S. Lee, S. W. Park, 2003, "An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays," *Trans. of Fuel*, Vol. 81, pp. 2417~2423
- (8) S. W. Lee, J. Kusaka, Y. Daisho, 2001, "Spray characteristics of alternative fuels in constant volume Chamber," *JSAE paper*, No. 20014340