

# 수치해석을 이용한 가솔린연료 분무 거동특성 연구

염 정 국<sup>†</sup>

(2009년 8월 21일 접수, 2009년 10월 5일 수정, 2009년 10월 9일 심사완료)

## Study on the Behavior Characteristics of Gasoline-Fuel Spray by Using a Numerical Analysis

Jeongkuk Yeom

**Key Words:** Atomization(미립화), Degree of freedom(자유도), Mixture formation process(혼합기형성 과정), Sauter mean diameter(Sauter평균직경), Spray structure(분무구조)

### Abstract

The focus of this study is placed on the behavior characteristics of gasoline spray under condition field of room temperature and pressure. To analyze the behavior and flow characteristics of injected fuel spray is important in speculation of mixture formation process. Also the exhausted emissions from actual engines can be controlled by the analyzed results. The  $\phi$ (degree of freedom) and  $K$ (energy ratio of particle motion) are selected as the simulation parameter. The factors affect characteristics of spray structure, and the factors are included in the sub-program of the KIVA-II code. In this study, the simulation study by modified KIVA-II code was conducted and the calculated results obtained by the modified KIVA-II code show good agreements with experimental results. As a result, applying the improved TAB model with  $\phi=8$  and  $K=2$  to simulation analysis of the KIVA-II code is sufficiently useful for analyzing the macro characteristics in spray structure, such as the spray tip penetration of injected fuel spray.

### 기호설명

- K : 에너지 비율
- p : 분사압력, MPa
- Z : 노즐로부터 거리, mm

### 그리스문자

- $\Phi$  : 자유도
- $\rho$  : 주위기체 밀도,  $\text{kg/m}^3$

### 하첨자

- a : 주위기체
- inj : 분사

### 1. 서론

내연기관의 연소실 내에서는 분사된 연료분무의 미립화(atomization), 증발(evaporation) 및 혼합기형성과정(mixture formation process)이 그 이후의 착화 및 연소과정을 지배한다. 연료의 분사에서부터 미립화에 도달하는 과정은 분사노즐 내부의 유체유동의 난류화나 캐비테이션(cavitation)을 포함하는 복잡한 분출과정과 함께 분사 후의 액체 표면의 불안정과 내부의 불안정의 증가에 기인하는 액체의 분열이라고 하는 불연속의 현상을 포함한다. 이러한 과정은 유체역학적인 불안정성을 포함하기 때문에 해석적인 규명은 아주 저속의 층류장을 제외하고는 아주 어렵다. 이 때문에 지금까지의 분무해석이나 분무연소장에 관한 연구

---

<sup>†</sup> 회원, 동아대학교 기계공학과  
 E-mail : laser355@dau.ac.kr  
 TEL : (051)200-7640 FAX : (051)200-7656

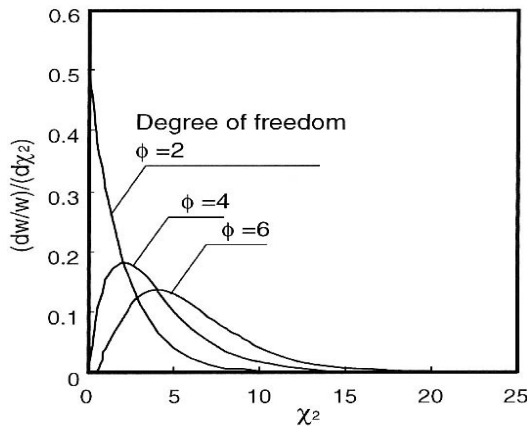


Fig. 1  $\chi^2$ -squared distribution function<sup>(15)</sup>

분야에 있어서 각종 물리적 간이(簡易)모델이 제안되어져 있고, 수치적 방법에 도입되고 있다. 현재 분무연소를 포함한 내연기관 내부의 연소장을 해석 가능한 다차원수치해석 코드로써는 KIVA<sup>(1)</sup>, STAR-CD<sup>(2)</sup> 등이 개발되어 사용되고 있다. 그 중에서 사용자가 독자적으로 새로운 모델을 추가 가능한 편리성이 있는 것은 KIVA 코드이고, 지금까지 KIVA-II,<sup>(3)</sup> KIVA-3,<sup>(4)</sup> KIVA-3V<sup>(5)</sup> 등이 개발되었다. 이 KIVA 코드에서는 분류분열모델로써 O'Rourke,<sup>(6)</sup> Reitz,<sup>(7)</sup> Huh & Gosman<sup>(8)</sup> 등, Arcoumanis<sup>(9)</sup> 등이 제안한 모델들이 있고, 또한 액적분열모델로써는 Ibrahim의 DDB,<sup>(10)</sup> Habchi & Baritaud<sup>(11)</sup> 등의 것들이 있다. 특히 TAB 모델에 대해서 Reitz<sup>(7)</sup> 등은 분무의 분열과정에 대해서 WB 모델(wave breakup model)을 제안하였다. 이것은 분무중의 액적분열(bag & stripping) 및 노즐에서 분사된 액류(blobs)의 분열과정을 모델화한 것이다. 또한 Ayoub & Reitz<sup>(12)</sup> 등은 다성분연료 증발모델을 이용해서 단일액적과 디젤기관에 있어 분무 및 연소의 계산을 행하였다. Lippert & Reitz<sup>(13)</sup> 등은 경유, 가솔린의 연료조성을 분포함수로써 표시하여 단일액적 및 분무의 계산을 실시하고, 연료에 포함된 휘발성과 연료성분의 관계를 조사하였다. 저자는 지금까지 KIVA-II 모델을 이용하여 증발 분무의 증발·확산과정 및 혼합기의 형성과정을 설명 가능한 모델을 구축했다.<sup>(14,15)</sup> 그 중에서 벽면에 충돌하기 이전의 분무 직경분포특성 등을 분무자체의 마이크로(micro)한 특성이 종래의 모델에서는 충분히 기술되고 있지

않다고 판단하여 TAB 모델을 이용한 경우의 분무 미립화특성, 즉 분무 중의 액적군의 평균직경 공간분포와 직경분포특성을 실험결과와 비교·검토하였다. 그 결과 지금까지 사용되고 있는 표준 TAB 모델에서는 분열 후 액적군의 분포가 자유도  $\phi=2$ 의  $\chi^2$ -분포함수인 Rosin-Rammler분포<sup>(16)</sup>를 사용하기 때문에 임의로 설정된 분사조건에서 액적의 직경이 상당히 과소평가되고, 그 결과로서 분무의 내부구조는 물론 분무선단도달거리 등의 거시적인 특성에 있어서도 낮은 정도의 결과를 얻었다. Fig. 1에 자유도  $\phi$ 의 변화에 대한  $\chi^2$ -분포함수의 일례를 나타낸다. 분열 후 직경분포  $\chi^2$ -분포의 중요 변수인 자유도  $\phi$ 의 상세설명은 기 발표한 논문<sup>(15)</sup>을 참고 바란다. 이에 본 연구는 표준 TAB 모델에서 액적직경의 과소평가를 해결하고, 보다 고정도의 거시적 분무거동을 예측한다. 이를 위하여 TAB 모델의 직경분포에 대하여 최적화를 실시하고, 특히 본 연구에서는 가솔린 연료 분무를 그 계산의 적용 대상으로 하였다.

## 2. KIVA-II 코드 지배방정식

### 2.1 연속방정식(질량보존)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}) = \nabla \cdot [\rho D \nabla \vec{u} (\rho_m / \rho)] + (d\rho_m / dt)^c + (d\rho / dt)^s \delta_{ml} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_m$ :요소 m의 밀도,  $\rho$ :전체의 밀도,  $\vec{u}$ :유체의 속도 벡터, D:확산계수,  $(d\rho_m / dt)^c$ :화학반응 기여항,  $(d\rho / dt)^c$ :분무에 의한 기여항,  $\delta_{ml}$ :분무를 구성하는 조성 l에 의한 기여항으로  $\delta$ 는 델타계수이다.

### 2.2 운동방정식(운동량보존)

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \left(\frac{l}{a^2}\right) \nabla p - A_0 \nabla \left[\left(\frac{2}{3}\right) \rho k\right] + \nabla \cdot \sigma + F^2 + \rho g \quad (2)$$

여기서, p:유체의 압력, a:무차원수로 低Mach수의 계산에서는  $a \equiv 1$ ,  $A_0$ :충류 또는 난류의 정수(0 또는 1), k:난류의 운동에너지,  $\sigma$ :뉴턴유체의 점성 응력텐서,  $F^2$ :분무로부터 얻는 운동량률, g:비체적력이다.

2.3 내부에너지방정식(에너지보존)

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} I) = -p \nabla \cdot \vec{u} - (1 - A_0) \sigma \nabla \cdot \vec{u} \quad (3)$$

$$- \nabla \cdot \vec{J} + A_0 \rho \epsilon + \frac{dQ^s}{dt} + \frac{dQ^c}{dt}$$

여기서, I:비내부에너지, J:열유속벡터로 열이동과 엔탈피의 확산을 고려, ε:난류운동에너지의 소산률, dQ<sup>s</sup>/dt:분무의 간섭 고려항, dQ<sup>c</sup>/dt:화학반응에 의한 열의 발생이다.

2.4 난류의 소산방정식(난류모델)

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \epsilon) = - \left[ \left( \frac{2}{3} \right) C_{\epsilon 1} - C_{\epsilon 3} \right] \rho \epsilon \nabla \cdot \vec{u} \quad (4)$$

$$+ \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \left( \frac{\epsilon}{k} \right) [C_{\epsilon 1} \sigma \nabla \cdot \vec{u} - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_s \frac{dW^s}{dt}]$$

여기서, 표준 k-ε 모델의 계수; C<sub>ε1</sub>=1.44, C<sub>ε2</sub>=1.92, C<sub>ε3</sub>=-1.00, Pr<sub>ε</sub>=1.30, dW<sup>s</sup>/dt:분무와의 간섭에 의해 생기는 항, C<sub>s</sub>:난류의 확산에 관여하는 분무의 영향도를 나타내는 계수이고, C<sub>s</sub>=1.50이다.

3. 가솔린 연료 자유분무의 최적화

3.1 흡기관 분사식 가솔린 분무의 직경분포

가솔린 자유분무의 최적화에 있어서 판정기준이 되는 직경분포의 측정실험을 실행했다. 실험조건을 Table 1에 나타낸다. 인젝터는 톱피드(top feed)식의 전자제어 핀틀(pintle)형 노즐을 사용했다. 연료로는 가솔린 연료의 한 성분인 i-옥탄(iso-octane)을 사용했다.

분무의 미립화특성, 즉 분열액적군의 직경분포 특성을 조사하기 위해 35mm 스틸 카메라(still camera, Nikon F301)에 의한 분무의 직접 확대산란광촬영을 행하였다. 그 결과를 Fig. 2에 나타낸다. Fig. 2는 분사개시 후 시간 t=3ms에 있어서 레이저 시트광에 의한 분무액적군의 확대산란광 촬영영역을 나타낸다. 필름은 고선해상도필름(Fuji Neopan SS400, 선해상도 850本/mm, ISO400)을 사용하였다. 또한 산란광촬영법에 의한 분무액적경의 측정에 있어서는 정확한 직경분포를 파악하기 위하여 미리 직경을 알 수 있는 유리비즈

Table 1 Experimental conditions

|                     |                               |            |
|---------------------|-------------------------------|------------|
| Injection pressure  | $\rho_{inj}$ [kPa]            | 300        |
| Injection duration  | $t_{inj}$ [ms.]               | 4.0        |
| Injection quantity  | $Q_{inj}$ [mg]                | 6.79       |
| Fuel                |                               | iso-octane |
| Fuel density        | $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 688.0      |
| Ambient pressure    | $P_a$ [kPa]                   | 101.3      |
| Ambient temperature | $T_a$ [K]                     | 293        |

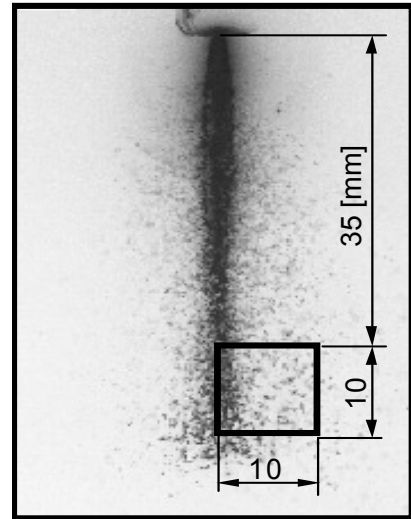


Fig. 2 Measurement area of droplet size distribution (t<sub>inj</sub>=4.0[ms], p<sub>inj</sub>=300[kPa], t=3.0[ms])

(glass bijou, TOSHIBA micro bijou, MB20, 평균직경 11μm ; 2~20μm)에 의한 검정실험을 실시하였다. 실제 유리비즈의 직경분포와 측정치를 비교하는 것에 의해 일정한 보정값을 구하고, 이 보정값을 실제의 분무입자에 적용함으로써 분무액적경의 측정을 실시하였다. 또한 수치해석에 있어서 직경계산은 계산 결과로 구한 직경의 최소값과 최대값을 각각 선택하고, 그 값 사이를 적절한 구간으로 나누어, 계산으로 구한 액적직경의 분포를 구하였다.

Fig. 3에 본 실험으로부터 구한 직경분포를 보인다. 촬영시간 t=3ms에 있어서 산술평균직경(Σd<sub>i</sub>n<sub>i</sub>/Σn<sub>i</sub>) d<sub>10</sub>=81mm, Sauter 평균직경(Sauter mean diameter: SMD, Σd<sub>i</sub><sup>3</sup>n<sub>i</sub>/Σd<sub>i</sub><sup>2</sup>n<sub>i</sub>) d<sub>32</sub>=124mm를 각각 얻었다. 이러한 결과를 기초로 다음과 같은 가솔린 자유분무의 최적화를 실시했다.

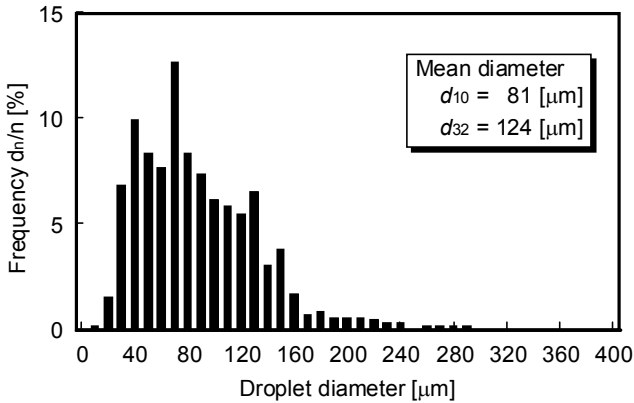


Fig. 3 Droplet size distribution of free spray  
( $p_{inj}=300[kPa]$ ,  $t=3.0[ms]$ )

3.2 가솔린 연료 자유분무의 최적화 과정

3.2.1 TAB 모델에 있어서 분열 후의 액적직경

TAB 모델에서는 분열 후의 액적직경을 예측하기 위하여 분열 전의 에너지와 분열 후의 에너지 사이에 에너지보존법칙을 적용해서 다음의 식으로 구한다.

$$r_{32} = \frac{r}{\left(1 + \frac{8K}{20} + \frac{6K-5}{120} \frac{\rho_d r^3}{\sigma} y^2\right)} \quad (5)$$

여기서,  $r_{32}$  : 분열 후의 액적 Sauter 평균직경  
 $r$  : 분열 전의 액적 직경

$K$ 는 전에너지에 대한 진동, 변형과 비틀림의 에너지 비율이다. 따라서  $K$ 의 값이 클수록 진동과비틀림 에너지가 증가하기 때문에 분열이 용이하다. 이 값은 수정되지 않은 오리지널 KIVA 코드에서는 10/3으로 설정되어져 있다. 즉  $K$ 값의 최적화를 수행하면 액적의 과잉분열이 개선될 수 있음을 알 수 있다. 또한 실제분무에 있어서는 입자수 분포의 분포는 액적직경에 의존한다. 오리지널 KIVA 코드에서는 자유도  $\phi=2$ 의  $\chi^2$ 분포함수가 적용되어져 있다. 여기서, 식 (5)에서 구한 분열 후의 액적 Sauter 평균직경  $d_{32}$ 와 자유도  $\phi$ 의 값에 의해 분열 후의 산술평균 직경  $d_{10}$ 가 구해진다. 오리지널 KIVA 코드에서는 자유도  $\phi$ 가 2이고,  $d_{10}=(1/3)d_{32}$ 로 설정되어져 있다. 즉, KIVA-II에 있어서는 분열 후의 액적 직경분포를 계산함에 있어 자유도  $\phi$ 와  $K$ 가 중요한 변수이다.

3.2.2 액막의 불안정성을 고려한 액적생성 모델  
액막의 불안정성을 고려한 액적형성 모델의 개념

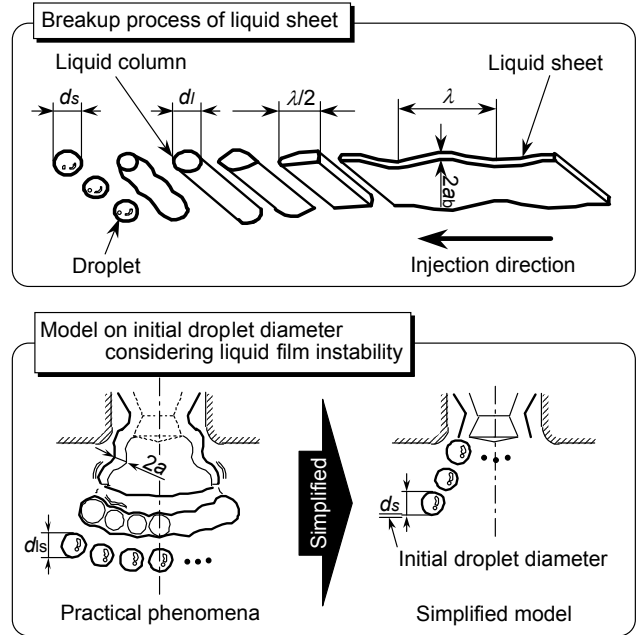


Fig. 4 Model on initial droplet diameter considering liquid film instability

을 Fig. 4에 보인다. 본 실험에서 사용한 핀틀형 인젝터에서 연료를 분사하면 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 분공근방에 중공원추상의 액막류가 형성된다. 액막은 표면파를 의해 성장하고, 그 후 액막에서 액적이 분열한다. Dombrowski<sup>(17)</sup>에 의하면, Fig. 4와 같은 모델을 고려할 시, 액막표면파의 파장을  $\lambda$ 라 하면, 비대칭 파의 경우에 액막은 반파장  $\lambda/2$ 로 절단되고, 직경  $d_l$ 의 원통형 ligament로 분열한다.  $d_l$ 은 다음의 식으로 구한다.

$$d_l = 1.12(\lambda a_b)^{1/2} \quad (6)$$

여기서,  $a_b$ 는 액막의 반두께 이다.

그리고 Kawamura 등<sup>(18)</sup>이 가스용해수를 이용한 연구에 의하면, 본 연구에서 설정한 실험조건과 같이 액막의 유속이 수십 m/s인 경우에는 ligament에서 생성되는 액적의 직경은  $d_l$ 과 같게 된다고 하고, 액막은 다음 식에 주어지는 직경  $d_s$ 를 가지는 액적군으로 분열한다.

$$d_s = 1.12(\lambda a_b)^{1/2} \quad (7)$$

또한 Fig. 5와 같이 간단한 모델을 이용해 분사율, 분무각, 액막속도가 분사시기 중에는 일정하

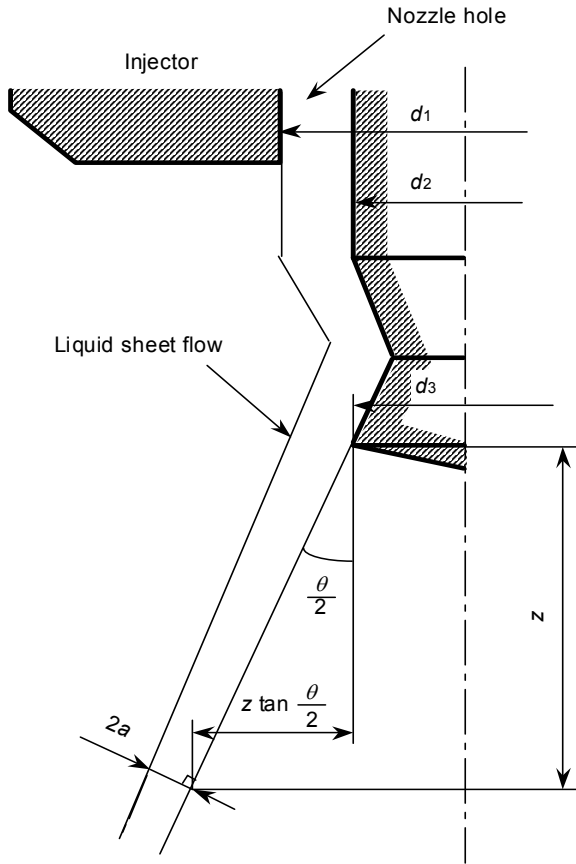


Fig. 5 Model on liquid sheet flow from pintle type injector

다고 가정하고 인젝터에서 임의의 위치에서의 액막반두께 \$a\_b\$를 다음의 식 (8)로 구하였다. 식 (8)에 인젝터형상 및 실험으로 구한 수치를 대입하고, 액막반두께 \$a\_b=20.5\text{mm}\$를 얻었다.

$$a_b = \frac{-[z \tan(\frac{\theta}{2}) + \frac{d_3}{2}] + \sqrt{[z \tan(\frac{\theta}{2}) + \frac{d_3}{2}]^2 + \frac{1}{4} \cos^2(\frac{\theta}{2})(d_1^2 - d_2^2)}}{2 \cos(\frac{\theta}{2})} \quad (8)$$

그리고 Morita<sup>(19)</sup> 등이 행한 흡기관 분사용의 분사밸브를 이용한 연구에서 \$\lambda=0.85\text{mm}\$를 이용했다. 이러한 결과들로부터 구한 분열 후의 액적직경 \$d\_s\$은 \$148\mu\text{m}\$이다.

3.3 계산결과

3.3.1 계산조건

Table 2에 계산조건을 나타낸다. 연료로는 전술한 것과 같이 i-옥탄(iso-octane)을 사용했다. 분무

Table 2 Numerical conditions

|                             |                               |                      |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Injection pressure          | $\rho_{inj}$ [kPa]            | 300                  |
| Injection velocity          | $V_{inj}$ [m/s]               | 22.84                |
| Injection duration          | $t_{inj}$ [ms.]               | 4.0                  |
| Injection quantity          | $Q_{inj}$ [mg]                | 6.79                 |
| Fuel                        |                               | iso-octane           |
| Fuel density                | $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 688.0                |
| Initial droplet temperature | $T_{pi}$ [K]                  | 293                  |
| Number of parcel            | $N_p$                         | 1000                 |
| Ambient temperature         | $T_a$ [K]                     | 293                  |
| Ambient pressure            | $P_a$ [kPa]                   | 101.3                |
| Maximum time step           | $dt_{max}$ [s]                | $1.0 \times 10^{-5}$ |
| Minimum time step           | $dt_{min}$ [s]                | $1.0 \times 10^{-8}$ |

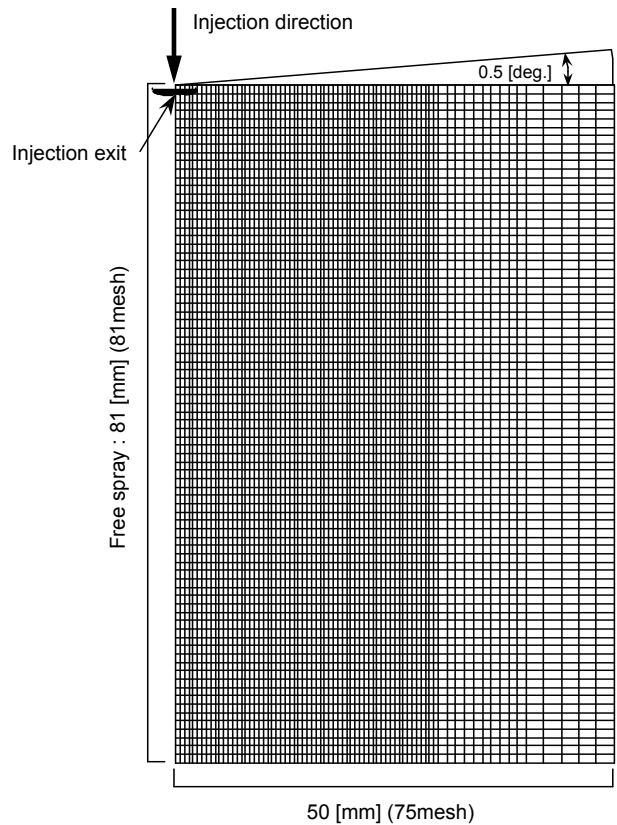


Fig. 6 Computational mesh in numerical simulation

원추각은 실험결과에서 구한 14deg.로 하였다. 계산영역은 Fig. 6의 계산 메쉬(mesh)를 이용했다.

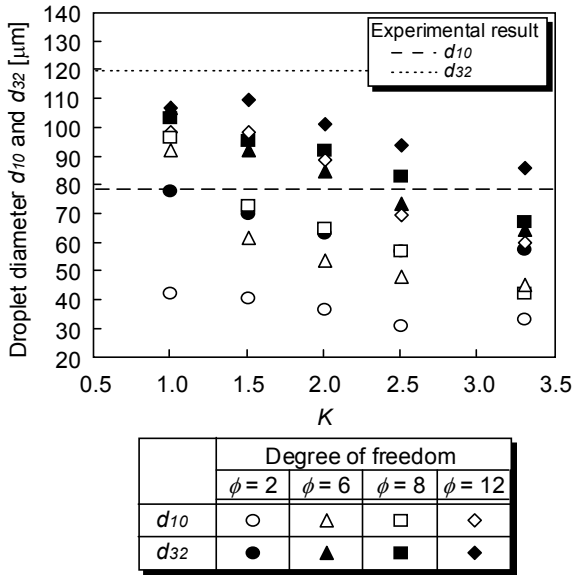


Fig. 7 Change in droplet diameter with  $\phi$  and  $K$  ( $t_{inj}=4.0[ms]$ ,  $d_s=90[mm]$ )

3.3.2 파라메타의 특성

Fig. 7에  $\phi$  및  $K$ 를 변화 시킨 경우, Fig. 2에 나타난 영역에서의 분사개시 후  $t=3.0ms$ 에 있어서 산술평균직경  $d_{10}$ 과 Sauter 평균직경  $d_{32}$ 를 값을 보인다. 초기 액적경은 인젝터의 핀틀과 hole 간의 2배인 액적직경을  $90\mu m$ 로 하였다.

Fig. 7로부터 자유도  $\phi$ 를 증가시킨 경우, 그 직경분포가 큰 직경측으로 이동함에 의해 평균직경이 증가하고, 산술평균직경과 Sauter 평균직경의 비  $d_{10}/d_{32}$ 는 증가하고 있다. 또한  $K$ 의 값을 작게 하면, 분열 전 액막이 가진 에너지가 작게 되고, 분열이 과소평가된다. 그 결과 평균직경을 크게 예측할 수도 있지만, 각 자유도에 대응하여 일정 값에 미치지 못하면 분열이 전혀 진행하지 않는 결과를 얻었다.

3.3.3 액막의 불안정성을 고려한 계산결과

초기 액적직경을 액막의 불안정성을 고려해서 구한 직경  $d_s=148\mu m$ 를 이용하고,  $K=10/3$ ,  $\phi=12$ 로 한 경우의 직경분포를 Fig. 8에 보인다. 이 그림으로부터 산술평균직경은 실험값과 좋은 일치를 나타내고 있지만, Sauter 평균직경은 과소평가되고 있다. 그러나 실험에서 확인되고 있는  $40\mu m$  이하의 액적은 계산할 수가 없다. 이것은  $d_{10}/d_{32}$ 의

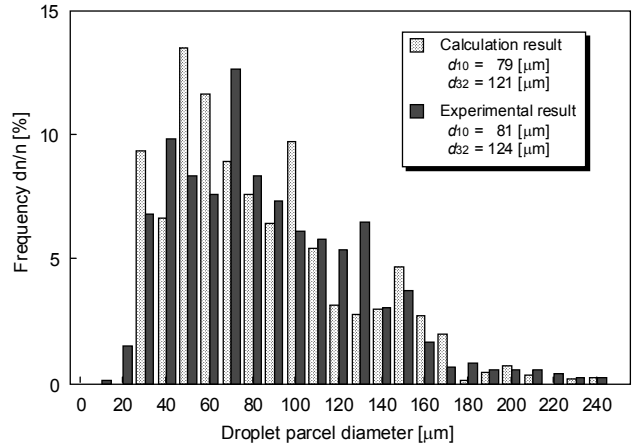


Fig. 8 Droplet size distribution of calculation result( $d_s=148[mm]$ ,  $\phi=12$ ,  $K=10/3$ )

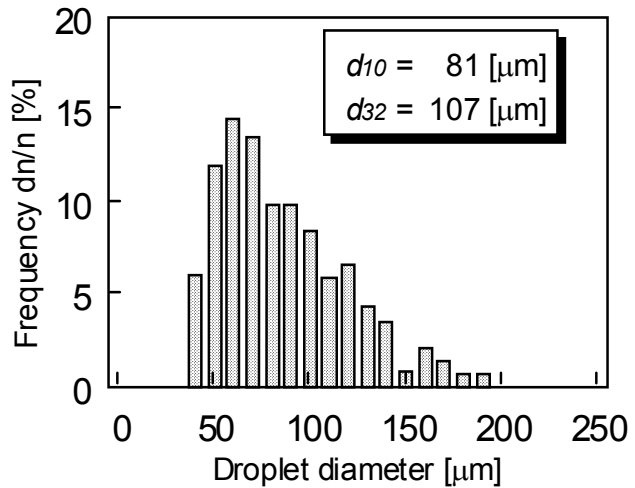
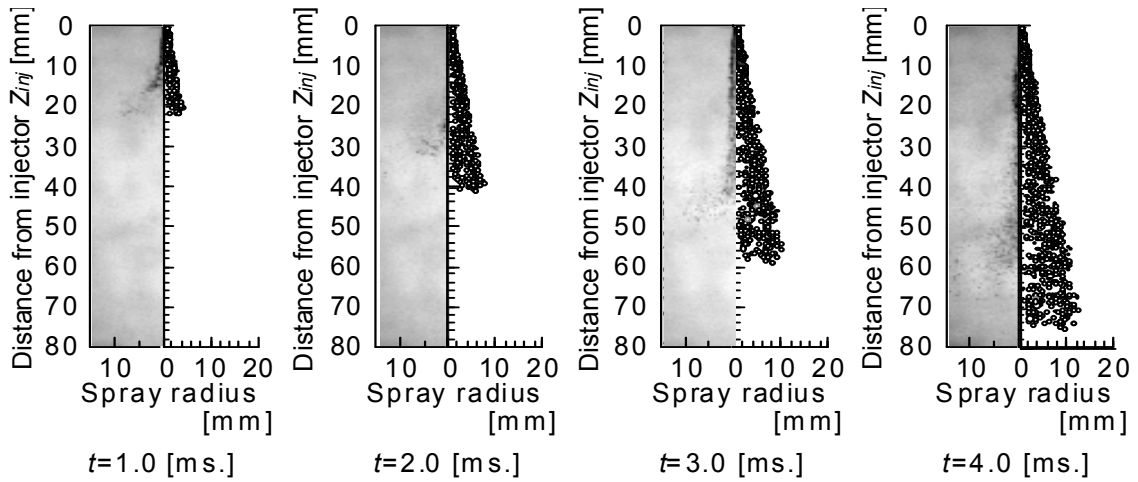
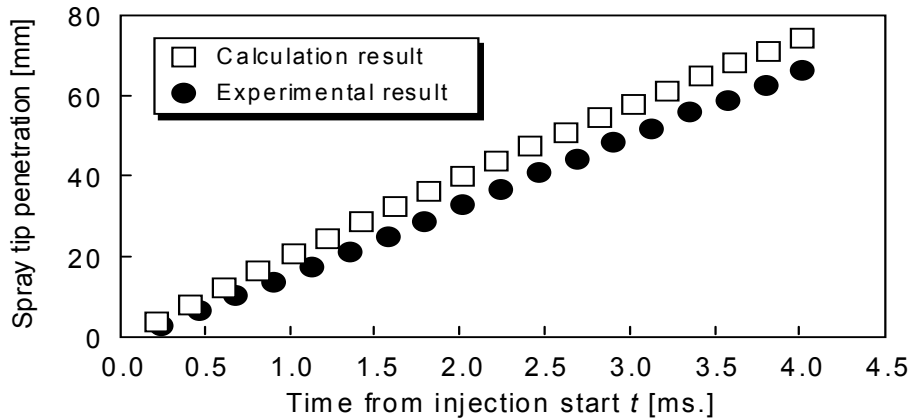


Fig. 9 Comparison of droplet size distribution with experimental result and calculation result (calculate with  $\phi=8$ ,  $K=2$ ,  $d_s=148[\mu m]$ )

값이 실험결과와 비교해서 큰 값을 나타내고 있기 때문이다. 따라서 실험결과에서 구한 산술평균직경과 Sauter 평균직경의 비는 약 2/3이기 때문에 12의 2/3가 되는 자유도가 8인 경우를 이용했다. 또한 계산값과 실험값을 비교해서 평균직경이 과소평가되기 때문에  $K$ 값을 표준인 10/3보다 작게 해서 계산을 실시했다. 그 결과 자유도  $\phi=8$ ,  $K=2$ 가 가장 평균직경 및 직경분포에 있어서 실험값과 좋은 일치를 나타냈다. 그 계산결과를 Fig. 9에 나타낸다. 그리고 액적의 공간분포 및 분무선단도달거리를 Fig. 10에 보인다. 산란광 사진으로부터 분무액막 근방에 큰 직경의 액적이 존재하고, 분무외곽부에 작은 직경의 액적 존재를 확인할 수 있다. 계산결과에 있어서도 동일한



(i) Spray images and distribution of droplets parcel



(ii) Spray tip penetration

Fig. 10 Comparison of distribution of droplets parcel and spray tip penetration with experimental results and calculation results

결과가 얻어졌고 분무구조를 잘 재현할 수 있다. 또한 분무선단도달거리에 관해서는 계산결과와 경우가 큰 값을 가지지만, 비교적 좋은 일치율 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 실시한 흡기관분사에 있어서 냉각 시동 시에 대응한 혼합기형성과정의 예측을 실험적 해석을 기초로 수치해석으로 행하였다. 흡기관 분사방식의 경우, 본 연구에서 이용한 KIVA-II 코드의 최적화에 의해 분사연료의 거동특성 해석은 가능하였고, 그 결과를 아래에 정리한다.

(1) 본 연구에서 제안한 수정 TAB 모델을 가지는 KIVA-II 코드 사용으로 가솔린 연료분무의 거시적 거동특성(분무선단도달거리 등) 해석은 가능했다.

(2) 자유도  $\phi$ 를 증가시킨 경우, 그 직경분포가 큰 직경측으로 이동함에 의해 평균직경이 증가하고, 산술평균직경과 Sauter 평균직경의 비  $d_{10}/d_{32}$ 는 증가한다. 또한 전에너지에 대한 진동, 변형과 비틀림의 에너지 비율인  $K$ 의 값을 작게하면, 분열 전 액막이 가진 에너지가 감소되고, 그 결과 분열이 과소평가된다.

(3) 수정TAB모델에 있어 자유도  $\phi$ 가 8,  $K$ 는 2인 경우가 분사연료 액적의 평균직경 및 직경분포에 있어서 실험값과 가장 좋은 일치를 나타낸다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Amsden, A. A., Ramshow, J. D., O'Rourke, P. J. and Dukowicz, J. K., 1985, "KIVA: A Computer Program for Two-and Three-Dimensional Fluid Flows with Chemical Reactions and Fuel Sprays," *Los Alamos National Laboratory Report LA-10254-MS*.
- (2) Ahmadi-Befrui, B., Uchil, N., Gosman, A. D. and Issa, R., 1996, "Modeling and Simulation of Thin Liquid Films Formed by Spray-Wall Interaction," *SAE Paper*, No.960627, 1996.
- (3) Amsden, A. A., O'Rourke, P. J. and Butler, T. D., 1989, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows and Sprays," *Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS*.
- (4) Amsden, A. A., 1993, "KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries," *Los Alamos National Laboratory Report LA-12503-MS*.
- (5) Amsden, A. A., 1997, "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," *Los Alamos National Laboratory Report LA-13313-MS*.
- (6) O'Rourke, P. J., Amsden, A. A., 1987, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," *SAE Technical Paper* 872089.
- (7) Reitz, R. D., 1987, "Modeling Atomization Process in High-Pressure Vaporizing Sprays," *Atomization and Spray Technology*, Vol. 3, pp. 309~337.
- (8) Huh, K. Y. and Gosman, A. D., 1991, "A Phenomenological Model of Diesel Spray Atomization," Proceedings of The International Conference on Multiphase Flows, September 24-27, Tsukuba, Japan.
- (9) Arcoumanis, C., Gavaises, M. and French, B., 1997, "Effect of Fuel Injection on the Structure of Diesel Sprays," *SAE Paper* 970799.
- (10) Ibrahim, E. A., Yang, H. Q. and Przekwas, A. J., 1993, "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," *AIAA Journal Propulsion*, Vol. 9 No. 4, pp. 652~654.
- (11) Habchi, C., Baritaud, T., 1997, "Modeling Atomization and Breakup in High Pressure Diesel Sprays," *SAE Paper* 970881.
- (12) Ayoub, N. S. and Reitz, R. D., 1995, "Multidimensional Computation of Multicomponent Spray Vaporization and Combustion," *SAE Paper*, No. 950285.
- (13) Lippert, A. M. and Reitz, R. D., 1997, "Modeling of Multicomponent Fuels Using Continuous Distributions with Application to Droplet Evaporation and Sprays," *SAE Paper*, No. 972882.
- (14) Yeom, J. K. and Fujimoto, H., 2003, "A Study on the Behavior Characteristics of Diesel Spray by Using a High Pressure Injection System with Common Rail Apparatus," *JMST KSME International Journal*, Vol. 17, No. 9, pp. 1371~1379.
- (15) Yeom, J. K., 2009, "Study on the Behavior Characteristics of the Evaporative Diesel Spray under Change in Ambient Conditions," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 33, No. 6, pp. 454~460.
- (16) Rosin, P. and Rammler, E., 1993, "The Laws Governing the Finess of powdered Coal," *Journal of the Institute of Fuel*, Vol. 8, No. 31, pp.29~36.
- (17) Dombrowski, N., Hooper, P. C., 1962, *Chemical Engineering Science*, Vol.17, pp.291-305.
- (18) Kawamura, K., Saito, A., Ochi, T. and Akira, Y., 1995, *The 4th Symposium*, ILASS-Japan, pp. 267~272.
- (19) Morita, S., Fujimoto, I., Senda, J. and Fujimoto, H., 1996, *Atomization*, Vol. 5-2, No. 10, pp.19~27.