

## 디젤 분무 거동에 관한 수치 해석적 연구

차경세<sup>1)</sup>, 최종욱<sup>1)</sup>, 박찬국<sup>2)</sup>

### Numerical Analysis of Sprays in the Combustion Chamber of Diesel Engine

K. S. Cha, J. W. Choi, C. G. Park

#### ABSTRACT

In this study, the spray models incorporated into the GTT code were tested for sprays injected in quiescent, swirling gases and for the sprays impinging on a flat wall, and the validity of the models has been confirmed by comparing the calculated results with the experimental data. Using this code, the gas flow, spray behavior and fuel vapor distributions in the combustion chamber of a D.I engine have been numerically analyzed with respect to the constant injection pressure and the injection pressure varying with injection time.

주요 기술 용어 : Free Spray(자유 분무), Spray Characteristics(분무 특성), Swirling Flows(선회류), Fuel Vapor Distributions(연료 증기 분포) Injection Pressure(분사 압력)

#### 1. 서론

최근 대기오염, 에너지 문제가 심각화되어 있고 내연 기관에서 배기 가스에 포함된 대기오염 물질의 저감이나 연비의 향상이 강하게 요구되고 있다. 특히, 디젤 기관에 있어서는 NOx, 흑연 등의 미립자를 동시에 저감하는 것이 요구되고 있고 그 대응이 무엇보다도 급선무로 되고 있다. 왕복식 내연 기관에 있어서는 압축 행정에 관한 실린더 내의 가스 유동 및 분무 거동이 연소 과정에 크게 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 이러한 성능 향상을 실현하기 위해서는 실린더 내의 연료 액적의 미립화 과정이나 증발 과정, 공기와의 혼합 상태를 알고 이것을 제어하고 연소의 최적화를 행할 필요가 있다. 하지만 실험적 수법에 따라 상세하게 측정하고 해석하는 것이 그 측정 방법도 어렵고, 또 상당한 시간과 비용이 든다는 것이 현 상태이다. 한편, 최근 계산기

의 눈에 띄는 발달에 의해 비교적 짧은 시간에서 수치 계산을 할 수 있게 되고 이에 따라 해석하고 정밀하게 예측 할 수 있다면 보다 효율 좋은 연소 상태를 달성하기 위한 상당히 유효한 것이라 생각된다. 하지만 현재 분무 계산 모델은 실린더 내의 복잡한 분무 거동을 예측하기에는 아직 충분하지 않다. 본 연구에서는 GTT (Generalized Tank and Tube Method) 코드를 사용하여 자유 분무, 충돌 분무, 스월이 존재하는 용기 내의 분무에 대해 수치 해석을 행하고 여기에서 얻어진 결과와 기존의 실험 결과와 비교하여 본 수치 해석의 유효성을 확인하고 디젤 엔진 연소실 내의 연료 분사에 있어 연료 분사 기간 동안의 분사 압력의 변화를 고려했을 때 분무 특성과 일정 분사 압력의 경우의 분무 특성을 비교 분석 해보았다.

#### 2. 수치 해석

본 연구에서는 유동 계산 방법으로 3차원 유동

1) 전남대 기계공학과 대학원  
2) 정회원 전남대학교 자동차 공학부

해석 프로그램인 GTT 코드를 이용하였으며 난 류 모델로는  $k-\epsilon$  모델을 이용하였다..

2.1 기초 방정식

유동 계산에 있어 일반 보존식은 다음과 같이 나타내진다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}\phi) - \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad } \phi) = S_\phi \quad (1)$$

각 보존식에 대한 종속변수  $\phi$ , 유효 확산 계수  $\Gamma_\phi$ , source 항  $S_\phi$  은 Table 1과 같다. 또한  $k-\epsilon$  모델에 관한 계수는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Expressions for  $\phi$ ,  $\Gamma_\phi$ , and  $S_\phi$

$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
1	0	$(S_d)_m$
$u$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \text{div } \vec{v}) - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial x} + (S_d)_u$
$v$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \text{div } \vec{v}) - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial y} + (S_d)_v$
$w$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \text{div } \vec{v}) - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial z} + (S_d)_w$
$h$	$(\frac{\mu}{\sigma_h})_{eff}$	$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} + \phi - \frac{2}{3} \rho k \text{div } \vec{v} + (S_d)_h$
$k$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G - \rho\epsilon$
$\epsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho\epsilon) + C_3 \rho\epsilon \text{div } \vec{v}$
$\Phi = \mu_{eff} \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} (\text{div } \vec{v})^2 \right]$ $G = \Phi - \frac{2}{3} \rho k \text{div } \vec{v}, \quad \mu_{eff} = \mu_{lam} + \mu_{turb}$ $\left( \frac{\mu}{\sigma_h} \right)_{eff} = \left( \frac{\mu}{\sigma_h} \right)_{lam} + \left( \frac{\mu}{\sigma_h} \right)_{turb}$		

Table 2. Constants for  $k-\epsilon$  model

$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_3 = -0.373$
$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 0.71$
$(\sigma_h)_{lam} = 0.71, (\sigma_h)_{turb} = 0.9$

2.2 분무 계산 방법

분무 계산 방법으로는 기본적으로 KIVA 코드<sup>(1)</sup>의 분무 모델을 사용하여 이에 액적 분열, 벽면 충돌의 추가와 확산이 액적에 미치는 영향에 대해서  $k-\epsilon$  모델용으로 변경하는 등의 개량이 첨가되어있다.

2.2.1 분무 증발 (Evaporation) 모델

본 연구에서 분무 모델은 기본적으로 KIVA 코드의 이산 액적 모델을 이용하고 있다. 이것은 실제 분무 전체를 수천 개의 parcel이라 불리는 액적대표 입자로 대표하는 것이다. parcel은 위치, 속도, 반경, 온도 등 같은 액적에서 구성된다. 분무 방정식은 모두 이 parcel에 따라 계산된다.

2.2.2 액적 분열 모델

분열 모델로는 Reitz<sup>(2)</sup>의 Wave 분열 모델을 기초로 하여 개량된 Wave 모델<sup>(3)</sup>을 사용하였다. Wave 모델에서의 최대 파장 및 최대 성장 속도를 구하는 식은 다음과 같다..

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{(1+0.45Z^{0.5})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \quad (2)$$

$$\Omega \left( \frac{\rho_1 a^3}{\sigma} \right)^{0.5} = \frac{0.34 + 0.38 We_2^{1.5}}{(1+Z)(1+1.4T^{0.6})} \quad (3)$$

$$Z = \frac{We_1^{0.5}}{Re_1} ; T = Z We_2^{0.5} \quad (4)$$

$$We_1 = \frac{\rho_1 W^2 a}{\sigma} ; Re_1 = \frac{W a}{\nu_1} \quad (5)$$

여기서  $\Lambda$  는 무엇보다도 빠르게 성장하는 액체 표면파의 파장을 나타내며  $\Omega$  는 그 최대 성장률을 나타낸다. 여기서  $a$ 는 모액적의 반경을 나타낸다. 액적 분열 과정에서 액체 표면파의 성장에 따라 새로이 생성되는 미소 액적은 다음 식을 만족하면서 형성된다.

$$r = \min \left[ \frac{(3\pi a^2 v_{re} / 2\Omega)^{0.33}}{(3a^2 \Lambda / 4)^{0.33}} \right] \quad (6)$$

$$(B_0 \Lambda > a)$$

$$r = B_0 \Lambda \quad (B_0 \Lambda \leq a) \quad (7)$$

그리고 모체가 되는 액적의 특성 크기는 특성 시간  $t_0$ 에 따라 변화하며, 특성 시간  $t_0$ 는 불안

정파 성장 속도와 해당 파장에 의존하는 다음 식에 의하여 주어진다.

$$\frac{da}{dt} = -\frac{a-r}{t_b} \quad (r \leq a) \quad (8)$$

$$(t_b = 3.726B_1 a / \Lambda\Omega,$$

$B_1 =$  Model coefficient )

Reitz는 분사액적 parcel 전체에 대해서 상기 모델을 적용하고 있는데 그 경우 분사 평균 입경이 너무 작아지는 것을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 분무 외주부에서 미립화가 촉진 되는 것이라 생각하고 Fig. 1에 나타난 것과 같이 분사 원추각  $\theta_0$  범위에서 분사되는 모든 parcel 내, 분공에서의 parcel 분사 방향이 분사 원추각  $\theta_0$  의 95%의 원추각에서 외측 parcel만 자액적을 만들 수 있는 것으로 하고 있다.

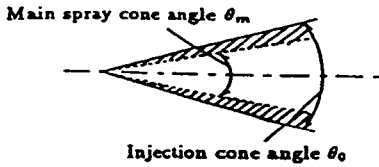


Fig.1 Illustration of injection cone angle and main spray cone angle  $\theta_0$

2.2.3 벽면 충돌 모델

우선 벽면 충돌 직전 액적 입사 웨버수  $We_{i,n}$  에서 임계 웨버수  $We_{c1} = 40, We_{c2} = 300$ 에 따라 세 개의 영역으로 분류하고 각각에 대해 다음과 같은 모델을 적용한다.

- 1).  $We_{i,n} < We_{c1}$ 인 경우 :  
액적은 벽면에 충돌 후 되돌아온다. 벽면 접선 방향의 속도 성분은 변화하지 않지만 법선 방향의 속도 성분은 Jayaratne의 실험 결과에 따라 감소한다.
- 2).  $We_{c1} < We_{i,n} < We_{c2}$  인 경우 :  
액적은 벽면에 충돌 후 부착한다.
- 3).  $We_{i,n} > We_{c2}$  인 경우 :  
벽면에 충돌한 액적은 벽면에 부착하는 것과 분열해서 흩어지는 것으로 나뉜다.

3. 검증 계산 및 결과

3.1 자유 분무 거동 해석

본 연구에 사용된 모델들의 유효성을 검증하기 위해 Hiroyasu et al.,<sup>(4)</sup>에 의해 행해진 실험 조건과 동일한 조건하에서 계산하여 실험 결과와 비교하였다. 테스트 조건은 Table 3과 같으며 계산 격자는 Fig.2에 나타내었다.

Table 3. Test condition for free sprays

Case	Ambient gas pressure $P_a$ (MPa)	Ambient gas density ( $N_2$ ) $\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	Injection velocity $V_0$ (m/s)	Injection cone angle $\theta_0$ (deg.)
1	0.1	1.13	107	2.9
2	1.1	12.4	101	9.7
3	2.1	23.7	95	13.4
4	3.0	33.9	90	16.0
5	5.0	56.5	86	20.6

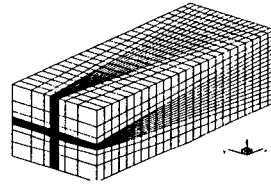


Fig.2 Computational grid for free spray (grid number 24x16x16)

그리고 분사 시간  $t = 4.2ms$ 에서의 분무 형태는 Fig 3.과 같다. Fig. 4에서 보듯이 각 case별 분무 선단 도달 거리의 계산 결과와 실험 결과<sup>(4)</sup>가 비교적 잘 일치 함을 알 수 있다.

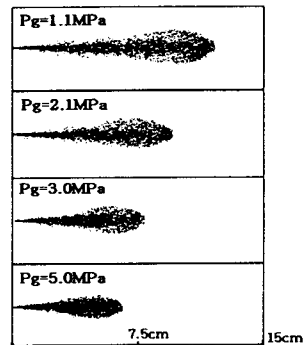


Fig.3 Spray shape for free spray (Case=2,3,4 and 5 at  $t = 4.2ms$ )

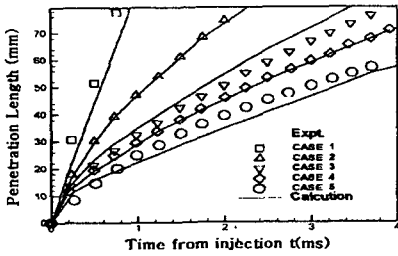


Fig.4 Spray tip penetration

3.2 스월(swirl)을 고려한 경우 분무 거동

실험 조건<sup>(5)</sup>과 동일한 조건으로 수치 해석을 수행하였고 그 결과를 실험 결과<sup>(5)</sup>와 비교하였다. 이에 대한 계산 격자를 Fig. 5에 나타내었다. 계산 조건으로 용기 내 공기의 압력과 온도는 각각 1.1MPa, 293K이며 노즐 직경은 0.21mm 로 반경 방향으로 분사하도록 하였다. 스월러의 회전 속도  $n_s = 0, 3000, 7500$ rpm의 경우에 대해서 하였다. Fig. 6, Fig. 7에 스월이 있는 두 경우의 분무 형태를 나타내었다. 스월러의 회전수가 클수록 분무 도달 거리는 짧은 반면 분무의 퍼짐의 정도가 커짐을 알 수 있다. 계산된 분무 선단 도달 거리를 실험에 의한 측정 결과<sup>(5)</sup>와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

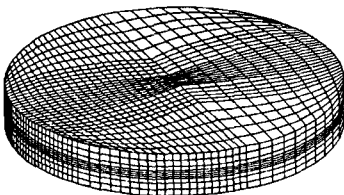


Fig.5 Computational grid for spray in swirl (grid number 30×30×10)

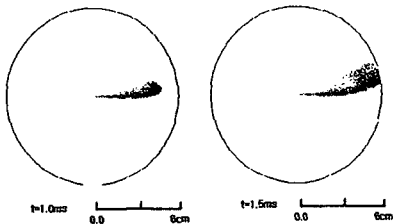


Fig.6 Spray shapes for  $n_s = 3000$  rpm

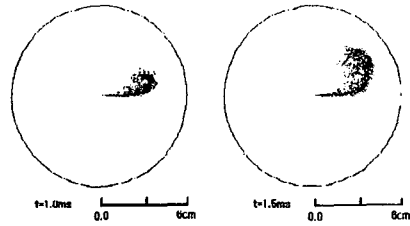


Fig.7 Spray shapes for  $n_s = 7500$  rpm

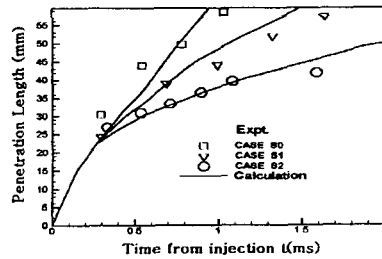


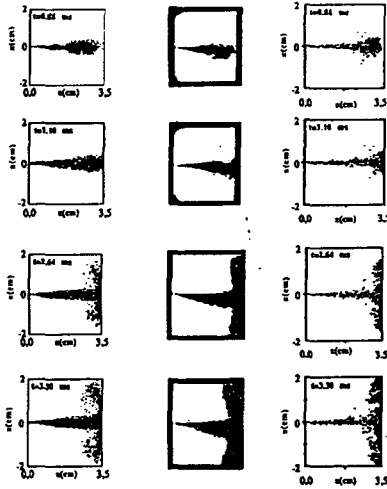
Fig.8 Spray tip penetration for cases S0, S1 and S2 ( $n_s = 0, 3000, 7500$ rpm for cases S0,S1 and S2)

3.3 충돌을 고려한 분무 거동

벽면 충돌 분무 모델의 타당성을 검토하기 위해 Guerrassi N.<sup>(6)</sup>의 실험 조건과 동일한 조건 하에서 상온의 평판에 충돌하는 분무 거동을 수치 해석하고 분무 형상을 KIVA II 코드에 의한 수치 해석 결과<sup>(6)</sup>와 고속 촬영에 의한 분무 형상<sup>(6)</sup>과 각각 비교한 결과를 Fig.9에 나타내었다. 계산 조건은 Table 4와 같다. 수치 해석에 의해 예측된 분무 형상이 실험에 의한 결과<sup>(6)</sup>와 잘 일치함을 알 수 있다. KIVA II 코드에 의한 결과는 벽면 충돌시 액적이 벽면에 정착되는 경우만을 고려한 경우이다.

Table.4 Test condition for impingement

Nozzle hole diameter (mm)	0.25
Nozzle hole length (mm)	0.8
Nozzle opening pressure (MPa)	23
Injected fuel mass (mg)	20.7
Injection duration (ms)	3.46
Gas pressure (MPa)	3
Gas temperature (K)	293
Wall temperature (K)	293
Wall inclination angle (degree)	0
Impingement distance (mm)	35



(a) GTT (b) Photographs (c) KIVA II  
 Fig.9 Comparison of computed drop parcel locations with photographs

4. 디젤 연소실 내 분무 거동

디젤 엔진 내 연료 분사시 분사 기간 동안 연료의 분사 압력은 일정하지 않고 변화 한다. 캠축의 회전 각도에 따라 나타나는 압력 파형을 측정 한 결과를 이용하여 분사 시간에 따른 분사 압력의 변화를 단순화된 식으로 나타내어 GTT 코드를 이용하여 분사 압력의 변화에 따른 연소실 내 분무 특성을 수치 해석을 통해 예측하고 평균 분사 압력으로 일정하게 분사했을 경우와 비교 검토 해보았다. Fig. 10은 캠축의 회전 각도에 따라 측정된 분사 압력 파형을 나타내고 있다. 분사 압력이 일정한 경우의 분사 압력으로는 평균치인 32MPa로 취하였다.

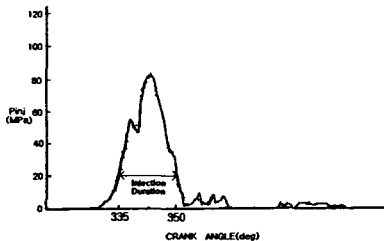


Fig.10 Injection pressure wave  
 수치 해석에 사용된 계산 격자는 Fig. 11과 같고 엔진의 제원은 Table.5와 같다. 캐비티의 중

심이 피스톤 중심으로부터 6.4mm 편심되어 있으며 분사 노즐 홀수는 6개이며 각 홀의 축과 캐비티 축과 이루는 각도는 75°이다. 연료는 tridecane을 사용하였다.

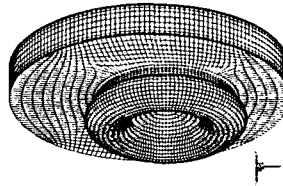


Fig.11 Computational grid  
 (grid number 44×44×26)

Table.5 Specification of Injection Nozzle

Bore × Stroke (mm)	109 × 118
Connecting Rod Length (mm)	181
Compression Ratio	17.9
Crank Radius (mm)	59
Number of Nozzle Holes	6
Diameter of Nozzle Hole (mm)	0.28
Injection Duration	15deg
Swirl Ratio	2.3
Fuel Amount (mg/st.)	107.432
Engine Speed (rpm)	1000

각각의 경우에 대해 분사 말기의 경우(11deg. BTDC)의 캐비티내의 수평 단면에서의 가스 속도 벡터는 Fig. 12와 같다. Fig.12에서 보듯이 연료 분사의 영향으로 인한 속도 성분의 증가 영역이 확연히 구분됨을 알 수 있으며 노즐 근처를 제외한 분무의 하류 부분인 캐비티의 벽면 부분에서 주위 가스 유동의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 캐비티 중심부에서의 속도 성분은 분사 압력이 변하는 경우에 일정 분사 압력의 경우보다 더크게 나타남을 알 수 있다.

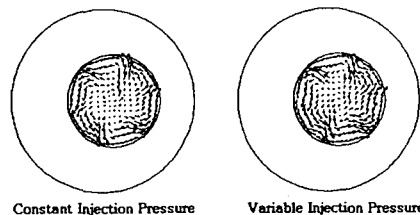
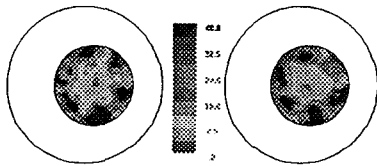
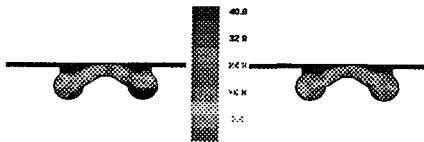


Fig.12 Gas velocity vectors in the horizontal section. (z=7mm)

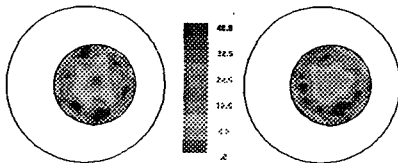
Fig.13(a), Fig.13(b)에서는 분사 완료 직전 (11deg. BTDC)의 캐비티내의 공기와 연료비 (A/F)의 계산 결과를 나타내고 있다. 두 경우 모두 노즐 부근에서는 농후한 연료 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig.13(b)에서 볼 수 있듯이 캐비티 내의 원형 영역 안에서의 연료 분포에서는 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 분사 압력이 일정한 경우에 캐비티 내의 원형 영역 안에서 연료가 희박한 영역이 분사 압력이 분사 기간 동안에 변화하는 경우보다 더 크게 존재함을 알 수 있다. Fig.13(c), Fig.13(d)에서는 분사 완료 직후(8deg. BTDC)의 캐비티내의 공기와 연료비(A/F)의 계산 결과를 나타내고 있다. 이와 같이 연소 과정에 있어 중요한 요소인 연료 분포 형태가 분사기간 동안에 분사 압력이 변하는 경우와 분사 압력이 일정한 경우에 서로 다른 분포 형태를 나타냄을 알 수 있다.



(a)Horizontal section(z=7mm,11deg.BTDC)



(b) Vertical section( X-X, 11deg. BTDC)



(c)Horizontal section(z=7mm,8deg.BTDC)



(d) Vertical section( X-X, 8deg. BTDC)

Fig.13 Contour of the air/fuel ratio

### 5. 결론

본 연구에서는 GTT 코드를 이용한 분무 모델들의 수치 해석 결과를 기존의 실험 결과와 비교 분석을 통해 본 수치 해석의 유효성을 확인함으로써 연료 분무 거동의 가시화 및 엔진 성능 개선에 활용 할 수 있음을 알 수 있었고 이 코드를 이용하여 실제 디젤 엔진 연소실 내 분무 거동에 있어 분사기간 동안의 분사 압력 변화를 고려한 경우와 분사 기간 동안에 분사 압력이 일정하다고 가정한 경우의 수치 해석 결과를 비교 검토 하였다. 분사 기간 중의 분사 압력의 변화는 연소실 내 유동 형태에 중요한 영향을 미치는 캐비티 형성, 스월, 스퀴시 유동, 연료 분사에 의한 유동 등의 인자들 중에 연료 분사에 의한 유동에 영향을 주게 되어 그러한 유동이 주위 가스 유동과 복합되어 연소 과정에 있어 고려되어야 할 중요한 요소인 연료의 분포 형태에 있어 분사 압력이 일정한 경우와 서로 다른 형태를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 수치 해석을 통한 분무 거동 특성의 보다 정확한 예측을 위해서는 분사 기간 동안의 분사 압력의 변화가 고려되어야 한다고 판단된다.

### 참고 문헌

1. Amsden, A. A., et al., "KIVA:A Computer Program for Two- and Three-Dimensional Fluid Flows with Chemical Reaction and Fuel Sprays", Los Alamos National Laboratory Report, LA-10245-MS,1985.
2. Reitz, R. D., "Modeling Atomization Process in high Pressure Vaporizing Sprays", Atomization and Spray Technology, Vol.3, p.309, 1987.
3. Wakisaka, T., et al., "Improvement of a Spray Model for Numerically Analyzing Fuel Spray Behavior", Proc. 13th Symp. on Interanl Combustion Engines, JSAE/JSME, p.109,1995.
4. Hiroyasu, H., et al., "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE Paper 740715, 1974
5. Hiroyasu, H., et al., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines", Trans. JSAE, No.21, p.339, 1980.
6. Guerrassi N., Champoussin J.C., "Experimental Study and Modeling of Diesel Spray/Wall Impingement", SAE Paper 960864, 1996.