

극초고압 조건에서 디젤 분무 특성에 미치는 액적 항력 모델의 영향

Influence of Droplet Drag Models on Diesel Spray Characteristics under Ultra-High Injection Pressure Conditions

고권현* · 이성혁** · 유홍선† · 이종태***

Gwon Hyun Ko, Seong Hyuk Lee, Hong Sun Ryou, and Jong Tai Lee

Abstract

The present article investigates the influence of droplet drag models on predictions of diesel spray behaviors under ultra-high injection pressure conditions. To consider drop deformation and shock disturbance, this study introduces a new hybrid model in predicting drag coefficient from the literature findings. Numerical simulations are first conducted on transient behaviors of single droplet to compare the hybrid model with earlier conventional model. Moreover, using two different models, extensive numerical calculations are made for diesel sprays under ultra-high pressure sprays. It is found that the droplet drag models play an important role in determining the transient behaviors of sprays such as spray tip velocity and penetration lengths. Numerical results indicate that this new hybrid model yields the much better conformity with measurements especially under the ultra-high injection pressure conditions.

Key Words : Ultra-High Pressure(극초고압), Drag Coefficient(항력계수), Droplet Breakup(액적 분열), Shock Wave(충격파)

기호설명	
C_D : drag coefficient	u', v', w' : fluctuation velocity components
Ma : Mach number	We : Weber number
Re : Reynolds number	y : droplet deformation parameter
t : time	Γ : diffusion coefficient
u, v, w : velocity components	μ : dynamic viscosity
† 책임저자, 중앙대학교 기계공학부	θ : void fraction
E-mail : cfdmec@cau.ac.kr	ρ : density
TEL: 02-820-5280 FAX: 02-813-3669	σ : surface tension
* 중앙대학교 대학원	ϕ : dependent variable
** 중앙대학교 기계공학부	
*** 성균관대학교 기계공학과	

Subscripts

- d : droplet or disk shape
- s : spherical shape

1. 서론

디젤 기관은 열효율이 높고 회박연소가 가능하기 때문에 차세대 자동차 엔진으로써 많은 기대를 받고 있지만 일반적으로 수트(soot)와 녹스(NOx) 등의 유해 물질이 다량으로 발생하는 단점을 갖고 있다. 따라서 최근의 디젤 엔진 분야에서는 성능의 향상과 함께 오염 물질의 저감이 가장 중요한 과제로 인식되고 있다^(1,2). 오염물질 저감 노력 중의 하나로 극 초고압 분사 시스템(ultra-high pressure injection system)에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 이 시스템은 400 MPa 이상의 극 초고압 상태에서 디젤 연료를 분사함으로써 분무선단침투 거리(spray tip penetration length)와 분무각(spray angle)을 증가시키고 공기의 유입을 증가시킬 뿐만 아니라 미립화를 촉진시킴으로써 혼합기의 형성을 촉진시킬 수 있다⁽³⁻⁶⁾. 그러나 혼합기의 형성 과정은 분사 조건에 민감한 영향을 받기 때문에 극 초고압 분사시스템의 실용화를 위해서는 극 초고압 조건에서의 분무 거동에 대한 물리적 이해를 증진하고 미립화 메카니즘의 원인을 명확히 이해하는 노력이 절실히 요구된다.

장세호 등⁽⁵⁾과 정대용 등⁽⁶⁾은 100 MPa 이상의 압력을 갖는 분사 시스템을 구성하고 연료의 미립화 정도를 측정하였다. 장세호 등⁽⁵⁾은 초고압 분사로 인한 미립화의 촉진이 녹스와 수트 등의 오염물질의 발생을 억제시킨다는 것을 확인하였다. 정대용 등⁽⁶⁾은 400 MPa 이상까지 분사 압력을 증가시킨 결과, 더 이상 미립화가 일어나지 않는 임계압력의 존재 가능성을 보였다. 일반적으로 150 MPa 이상의 분사 압력에서는 분무선단 근처에서 충격파가 발생되어 분무 액적의 특성에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다. Nakhira 등⁽⁷⁾은 최대 250 MPa의 분사 압력에서 분무 형상을 가시화하고 분무선단거리와 SMD(Sauter 평균직경)을

측정하였다. 또한 그들은 분무선단에서 하류 방향으로 진행되는 충격파의 존재를 관찰하였다. Machpee 등⁽⁸⁾도 X-ray 기법을 이용하여 50~135 MPa의 분사 압력에서 발생하는 충격파를 가시화하고 하류 영역으로 충격파의 전파와 벽면 반사 현상을 실험을 통해 입증하였다. 이상과 같이 초고압 분사에서 충격파의 발생이 확인되고 있음에도 불구하고 이러한 충격파가 분무의 거동에 미치는 영향에 대한 이론 모델이나 실험 데이터는 충분치 않은 실정이다.

일반적으로 분사된 액적의 비정상 거동은 미립화 정도와 기상에 의한 항력에 의해 영향을 받는다. 액적 미립화 모델의 경우, Reitz⁽⁹⁾의 Wave 모델과 O'Rourke 와 Amsden⁽¹⁰⁾의 Tab 모델이 가장 대표적인 액체 미립화 모델들이며, 액적 항력에 대해서 수정된 Liu 등⁽¹¹⁾의 DDB (droplet drag breakup) 모델이 많이 사용되고 있다. 액적항력계수는 충격파에 의해 발생하는 복잡한 현상에 의해 영향을 받는 대표적인 파라미터이다. 기존 연구들이 사용하는 액적항력 계수에 대한 모델들은 충격파에 대한 영향을 고려하지 않기 때문에 극 초고압 상태에서 분무의 비정상 거동을 정확히 예측하기 어렵다. 따라서 극 초고압 분무해석을 위해서는 액적과 충격파와의 상호작용에 관련된 물리적 이해를 통해 기존 모델을 합리적으로 개선하거나 새로운 모델을 개발하는 것이 필요하다.

본 연구는 충격파가 존재하는 극 초고압 영역에서 디젤 분무 거동 특성을 이해하기 위해 액적 변형과 충격파의 상호작용을 모사할 수 있는 액적항력계수의 하이브리드 모델을 선행 연구들⁽¹¹⁻¹⁴⁾에 기초하여 개발하고 기존의 모델과 비교한다. 해석 결과는 정대용 등⁽⁶⁾의 실험 결과와 비교함으로써 타당성을 입증하고 액적항력 모델링이 극 초고압 조건에서의 분무 거동에 대한 미치는 영향을 분석한다.

2. 이론적 배경

2.1 이상 유동에 대한 지배 방정식

본 연구에서 다루는 이상 유동은 기상(gas phase)의 경우, 오일러리안 방식을 이용하고 액상(liquid phase)의 경우, 라그랑지안 방식을 사용하여 해석한다. 기상의 지배 방정식을 일반적인 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\theta \rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x} (\theta \rho u \phi) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\theta \rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\theta \rho w \phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (\theta \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\theta \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (\theta \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}) + S_\phi + S_\phi^d \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 기상의 밀도이고 ϕ 는 종속변수로서 속도 성분, 난류 에너지와 난류에너지 소멸률을 각각 나타낸다. 또한 θ 는 기상의 체적 분율이며 Γ_ϕ 와 S_ϕ 는 각각 확산 계수와 생성항을 의미한다. 두번째 생성항 S_ϕ^d 에서 위첨자 d 는 액상과의 상호 작용에 의한 생성항이다.

한편 액상의 거동은 궤적과 운동량 방정식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx_d}{dt} = u_d, \quad \frac{dy_d}{dt} = v_d, \quad \frac{dz_d}{dt} = w_d \quad (2)$$

$$\frac{du_d}{dt} = K_d(u + u' - u_d) + S_{ud}$$

$$\frac{dv_d}{dt} = K_d(v + v' - v_d) + S_{vd} \quad (3)$$

$$\frac{dw_d}{dt} = K_d(w + w' - w_d) + S_{wd}$$

여기서 S_{ud} , S_{vd} , 그리고 S_{wd} 는 각각 액적과 기상과의 상호작용에 관한 생성항이며 운동량계수 K_d 는 다음과 같이 주어진다.

$$K_d = \frac{C_D}{8} \rho \frac{\pi D^2}{m_d} V_{rel} \quad (4)$$

여기서 C_D 는 항력계수를 의미하며 V_{rel} 은 액적과 주변 기상과의 상대 속도를 나타낸다.

2.2 액체 미립화 모델

공기 역학적 작용에 의한 액적 분열 과정을 위한 다양한 모델들^(9,10)이 제시되어 왔으며 본 연구에서는 O'Rourke와 Amsden⁽¹⁰⁾의 TAB 모델을 사용한다. TAB 모델은 액적 변형과 진동이 스프링-질량 계와 유사하다는 가정을 통해 개발된 모델로서 계산 시간 간격 내에서 속도가 일정할 때 다음과 같은 식을 유도하고 액적 변형 파라미터 $y = (2x/r)$ 가 1보다 클 때 분열이 발생하도록 고안되었다.

$$\begin{aligned} y(t) = & \frac{C_F}{C_k C_b} We_g + e^{-t/t_d} \\ & \left\{ \left(y_0 - \frac{C_F}{C_k C_b} We_g \right) \cos \omega t \right. \\ & \left. + \left(\frac{y_0}{\omega} + \frac{y_0 - \frac{C_F}{C_k C_b} We_g}{\omega t_d} \sin \omega t \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 진동주파수와 점성에 의한 감쇠시간은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\omega^2 = C_k \frac{\sigma}{\rho r^3} - \frac{1}{t_d^2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{t_d} = C_d \frac{\mu}{2\rho r^2} \quad (7)$$

여기서 C_d , C_k , C_F 그리고 C_b 는 모델 상수로서 각각 5, 8, 1/3 그리고 1/2를 사용하였다⁽¹⁰⁾. 분열 과정이 일어난 후 액적의 크기와 개수는 분열 전·후의 질량 보존과 에너지 평형에 의해 결정된다.

2.3 액적 항력에 대한 하이브리드 모델

앞서 지적한 바와 같이 극 초고압 영역에서 존재하는 충격파는 액적의 항력 변화에 많은 영향을 미친다⁽¹⁴⁾. 그러나 분무 거동에 대한 대부분의 수치 해석 연구^(15, 16)에서는 액적을 완전 구형으로 가정하여 항력 계수를 다음과 같이 결정하였다⁽¹²⁾.

$$C_{D,s} = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (1 + \frac{1}{6} Re_d^{2/3}) & Re_d \leq 1000 \\ 0.424 & Re_d < 1000 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 Re_d 는 액적 직경에 대한 레이놀즈수를 나타낸다. 그러나 분무 액적들이 기상의 유동과 상호 작용하는 동안 액적 변형이 발생하고 액적이 받는 항력이 증가한다^(11, 13). 액적 변형을 고려하기 위해 Schmehl⁽¹³⁾은 변형에 의한 정면적(frontal area)의 증가와 항력 계수를 다음과 같이 고려하였다.

$$A_f = \frac{1}{4} \pi D_o^2 y \quad (9)$$

$$C_D = f C_{D,s} + (1-f) C_{D,d} \quad (10)$$

여기서 y 는 식(5)를 이용하여 계산된 TAB 모델⁽¹⁰⁾에서 계산된 액적 변형 파라미터이다. 또한, $C_{D,s}$ 와 $C_{D,d}$ 는 각각 구형과 원판 형태에 대한 항력 계수이고 f 는 형상 계수를 나타낸다. 각 항력계수들과 형상계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{D,s} = 0.36 + 5.48 Re^{-0.573} + \frac{24}{Re_d} \quad (11)$$

$$C_{D,d} = 1.1 + \frac{64}{\pi Re_d} \quad (12)$$

$$f = 1 - (1/y^3)^2 \quad (13)$$

Hsiang과 Faeth⁽¹⁴⁾는 충격파 섭동 조건에서 다양한 웨버수와 레이놀즈수에 대해 액적 변형과 항력 계수를 측정하였고 다음과 같은 실험 식을 제시하였다.

$$C_D/C_{D,s} = a + b (D_{max}/D_0)^3 \quad (14)$$

여기서 a 와 b 는 실험 상수이고 본 연구에서는 Hsiang과 Faeth⁽¹⁴⁾의 실험 결과로부터 각각 0.48 과 0.39의 값을 이용한다. D_{max} 는 변형된 액적의 최대 직경이며 TAB 모델의 액적 변형 파라미터 y 를 이용하여 $D_{max}/D_0 = (1+y)$ 로 나타낼 수 있다.

Table 1 Droplet drag models.

	Model 1	Model 2
Frontal Area	$\pi D_0^2/4$	Eq. (9)
Drag coefficient	Eq. (8)	Eq. (10) ($Ma < 0.3$) Eq. (14) ($Ma > 0.3$)
Reference	(12)	(13),(14)

Table 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 기존의 연구 결과들을 이용하여 충격파가 존재하는 극 초고압 영역에서 액적 항력을 계산한다. 우선 액적과 주변 기상의 상대속도를 기준으로 마하수가 0.3 보다 작을 때는 충격파의 영향이 거의 나타나지 않기 때문에 식 (10)을 이용하여 항력 계수를 결정하고 마하수가 0.3 보다 클 때는 충격파의 영향을 고려하여 액적의 항력계수를 예측하였다. 기준 마하수 0.3은 Hsiang과 Faeth⁽¹⁴⁾의 실험에서 주어진 웨버수와 레이놀즈수를 통해 결정되었다. 또한 액적의 단면적은 식 (9)를 사용하여 계산된다.

3. 단일 액적 거동 해석

본 절은 앞서 언급한 액적 항력 계산 모델들의 계산 특성을 살펴보기 위해 단일 액적에 대한 계산을 수행한다. Table 1은 계산에 사용된 모델을 나타낸다. Model 1은 완전 구형 가정을 바탕으로 한 Yuen 과 Chen⁽¹²⁾의 모델이다. Model 2는 식 (9)~(14)로 구성되며 기존 연구 결과들^(13,14)을 혼합한 모델이다. 단일 액적 해석은 200 μ m인 디젤 연료 액적이 정지되어 있는 기체 내를 초기 마하수 0.1과 1.0으로 진행하는 경우에 대해서 수행하였고 시간에 따른 항력 계수와 액적 속도 변화를 조사하였다.

Fig. 1은 시간에 따른 항력 계수 C_D 값의 변화를 나타낸다. 그림에서 시간이 경과함에 따라 전반적으로 항력 계수가 증가하는 경향을 보여 준다. 이것은 시간이 경과함에 따라 항력의 영향으로 인해 속도가 감소하기 때문이며 식 (8)과 식 (11)~(12)에서 알 수 있듯이 항력 계수는 액적의 레이놀즈수에 반비례하는 경향을 갖고 있다. 초기 마하수에 관계없이 Model 1에 비해 Model 2가 항력 계수를 크게 예측하고 있는 것

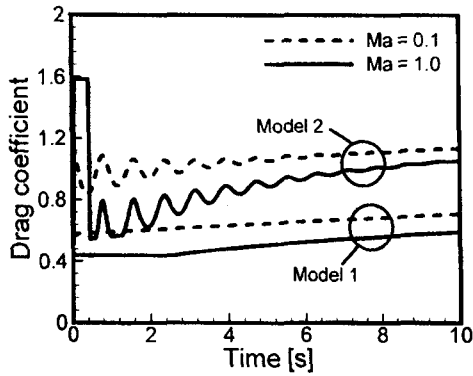


Fig. 1 The predicted drag coefficients using two different models at Ma numbers of 0.1 and 1.0.

을 볼 수 있는데 이것은 Model 2가 액적의 변형을 고려하고 있기 때문이다. Model 2의 경우, 초기 항력 계수 값이 진동하는 경향을 보여주고 있는데 이것은 액적의 주기적 변형이 나타남을 보여주는 것이다. 이러한 경향은 액적 변형 파라미터 η 에 의해 계산에 반영된다. 마하수가 1.0인 경우 Model 2의 계산 결과를 보면 초기에 일정한 값으로 유지되고 있는 것으로 볼 수 있는데 이는 액적 변형 파라미터 η 가 분열 조건에 이르러 최대 변형으로 가정되었기 때문이다.

Fig. 2는 시간에 따른 속도 변화를 보여준다. 마하수가 1.0일 때 Model 2를 사용한 경우 초기 액적 속도가 급격히 감소하며 이것은 Fig. 1에서와 같이 초기 영역에서 항력 계수가 가장 크기 때문이다. 전체적으로 Model 1에 비해서 Model 2의 경우가 속도의 감소를 크게 예측하고 있다.

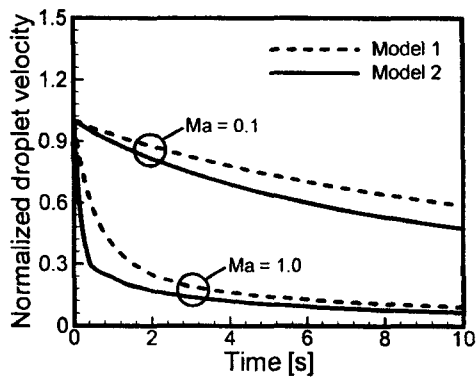


Fig. 2 Predicted drag velocities using different two models for different two Ma number.

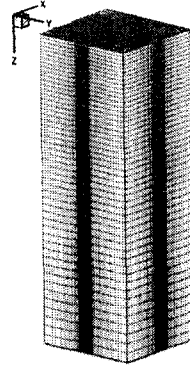


Fig. 3 Grid system for the present calculations.

4. 극초고압 분무 해석

본 절은 극 초고압 분사 조건에서 디젤 분무의 거동을 수치해석하고 두 개의 액적 항력 모델을 상호 비교하며 모델의 타당성을 파악하기 위해 기존 실험 결과⁽⁶⁾와 상호 비교한다. 본 연구에서 사용한 분무 해석 코드는 오일러리안-라그랑지안 형태의 지배방정식을 기초로 구성되며 유한 체적법을 이용하여 이산화된다. 대류/확산 항의 경우, 하이브리드 수식을 이용하고 비정상 항은 오일러의 음함수 법을 사용한다. 액상에 대한 상미분방정식들은 오일러의 음함수 법에 의해 계산되고 비정상유동의 압력장을 해석하기 위해서 PISO 알고리즘을 채택한다. Fig 3은 본 연구에서 격자 독립성 테스트를 통해 채택한 $50 \times 50 \times 50$ 의 해석 격자를 나타내고 있다. 본 연구에서는 정대용 등⁽⁶⁾에 의해 수행된 실험에 대해서 수치해석을 수행한다. 노즐의 직경은 $200 \mu\text{m}$ 이고 150과 414 MPa의 분사압력 조건을 가진 두 가지 경우에 대해 해석한다. 이 때 작동 유체는 디젤 연료이다. 본 연구는 액적 분열 과정을 모사하기 위해 TAB 모델을 이용하고 액적 충돌 현상은 O'Rourke⁽¹⁷⁾의 모델, 그리고 액적-에디간 상호 작용에 대해서는 Gosman과 Ioannides⁽¹⁸⁾의 모델을 사용하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 분사 압력이 150 MPa인 경우, 분무선단거리 및 분무 선단 속도에 대한 예측 결과를 실험 결과와 비교한 그림이다. 항력 계수와 관련된 두 모델의 결과가 전체적으로는

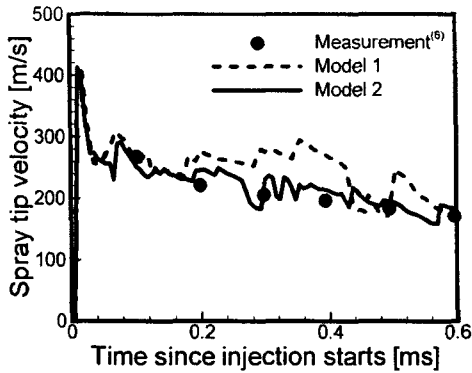


Fig. 4 Comparison between the experimental data⁽⁶⁾ and the predicted results using different two models for spray tip velocity for case of $P_{inj} = 150$ MPa.

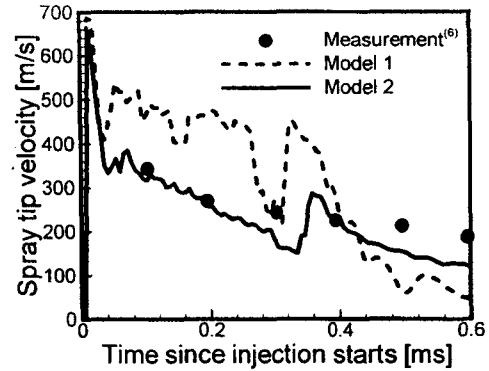


Fig. 6 Comparison between the experimental data⁽⁶⁾ and the predicted results using different two models for spray tip velocity for case of $P_{inj} = 414$ MPa.

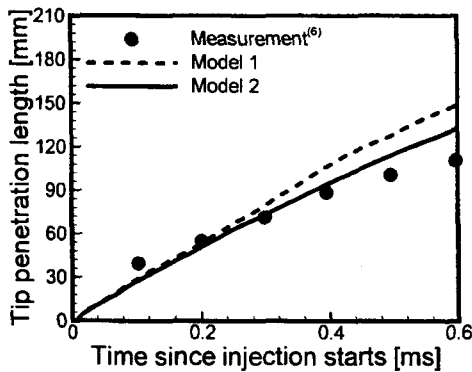


Fig. 5 Comparison between the experimental data⁽⁶⁾ and the predicted results using different two models for spray tip penetration length for case $P_{inj} = 150$ MPa.

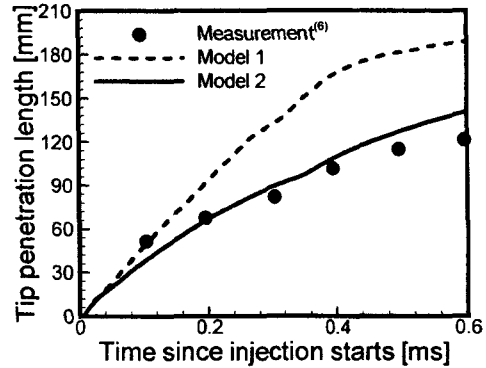


Fig. 7 Comparison between the experimental data⁽⁶⁾ and the predicted results using different two models for spray tip penetration length for case $P_{inj} = 414$ MPa.

유사한 경향을 보이고 있는 것으로 알 수 있다. 그러나 Model 1의 결과를 보면 분사 후 0.2 ms 경과했을 때부터 선단 속도를 다소 상향 예측하고 이에 따라 분무 선단 거리 역시 0.2 ms 때부터 상향 예측하게 되어 0.6 ms에 이르러서는 실험 결과와 큰 오차를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이와 달리 Model 2의 경우, 전체 계산 시간에 걸쳐 실험과 좋은 일치율을 보여주고 있다. 이것은 액적의 변형과 충격파의 영향을 고려하는 것이 액적의 속도 예측에 큰 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

Fig. 6과 Fig. 7은 분사 압력이 414 MPa일 때의 해석 결과를 실험 결과와 함께 나타낸 그림

이다. 앞선 150 MPa의 결과에 비해 액적 항력 모델링의 영향이 계산 결과에 더욱 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 분무 선단 속도의 예측에 있어서 Model 1은 0.05 ms에서 약 500 m/s 정도로 예측하고 있는 것에 반해 Model 2는 약 350 m/s 정도로 예측하고 있다. 이러한 선단 속도차이는 액적의 이동 거리에 직접적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 분무 선단 거리의 예측에 있어서 두 모델의 차이는 분사 초기에서부터 명확하게 나타난다. 실험 결과와 비교할 때 전체 계산 시간 동안 Model 2를 이용한 해석 결과가 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 즉 분사 압력이 증가함에 따라 액적이 받는 항력이 분무

거동에 미치는 영향이 매우 중요함을 확인하였다. 특히 극 초고압 영역에서 분사된 분무를 해석하는 데에 있어서 액적의 변형과 충격파 섭동과의 상호작용에 의한 액적 항력의 변화를 반드시 고려해야 함을 알 수 있다. 현재 개발된 모델은 극초고압 상태에서 액적 항력 변화를 고려하도록 고안되어 있지만 실험 결과에 대한 의존도가 매우 높다. 본 연구에서 제안된 모델의 타당성을 보다 명확하게 확보하기 위해서 이후 다양한 실험결과와 비교 검토하여야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 극 초고압 분무의 거동을 수치해석하고 액적 항력을 효과적으로 예측할 수 있는 혼합 모델을 제안하였다. 혼합모델은 액적 변형과 충격파 섭동간의 상호 작용을 모사할 수 있도록 고안되었고 기존의 모델과 상호 비교하였다. 단일 액적 거동과 극 초고압 분무에 대한 개별적 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 우선 단일 액적 거동에 대한 해석을 통해 액적 변형과 충격파의 영향을 고려한 경우, 기존의 구형 액적 가정에 근거한 모델에 비해 높은 항력 계수를 예측하였고 이로 인해 액적 속도가 급격히 감소하고 있음을 확인하였다. 두 번째, 극 초고압 분무 해석 결과로부터 액적 항력 모델은 분무 거동 예측에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 특히 극 초고압 영역에서는 매우 결정적인 역할을 하였다. 또한 기존 실험 결과⁽⁶⁾와 비교할 때 액적 변형과 충격파 섭동에 대한 영향을 고려한 혼합 모델이 실험 결과와 매우 좋은 일치율을 나타냈다. 그러므로 극 초고압 분무 거동의 수치해석에 있어서 해석 결과의 정확성을 향상시키기 위해서는 액적의 변형과 충격파 섭동에 따른 항력의 변화를 반드시 고려하여야 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2001-00386-000(2002))지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

1. L. A. Reams and T. A. Wiemero, "Capabilities of Diesel Electronic Fuel Control," SAE 820449, 1982.
2. R. Racine and M. Miettaux, "Application of a High Flexible Electronic Injection System to a Heavy Duty Diesel Engine," SAE 910184, 1991.
3. S. Kobayashi, "NOx Reduction from Diesel Combustion Using Pilot Injection with High Pressure Fuel Injection," SAE 920461, 1992.
4. H. Yokota, "Fast Burning and Reduced Soot Formation via Ultra-High Pressure Diesel Fuel Injection," SAE 910225, 1991.
5. 장세호, 김준효, 안수길, "전자유압식 분사계에 의한 초고압 디젤분무의 거동에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제 4 권, 제 2 호, pp. 137~149, 1996.
6. 정대용, 이종태, 홍기배, "극 초고압영역에서의 디젤 연료의 자유분무특성에 관한 연구," 한국액체미립화학회 논문집, 제 7 권, 제 4 호, pp. 16~21, 2002.
7. T. Nakahira, M. Komori, M. Nishida, and K. Tsujimura, "The Shock Wave Generation around the Diesel Fuel Spray with High Pressure Injection," SAE 920460.
8. A. G. MacPhee, M. W. Tate, C. F. Powell, Y. Yue, M. J. Renzi, A. Ercan, S. Narayanan, E. Fontes, J. Waltehr, J. Schaller, S. M. Gruner, and J. Wang, "X-ray Imaging of Shock Waves Generated by High-Pressure Fuel Sprays," Science, Vol. 295, No. 15, pp. 1261~1263, 2002.
9. R. D. Reitz, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays," Atomization and Spray Technology, Vol. 3, pp. 309~337, 1987.
10. P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, "The TAB Model for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 872089,

- 1987.
11. A. B. Liu, D. Mather, and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Drop Drag and Breakup on Fuel Sprays, SAE 930072, 1993.
 12. M. C. Yuen and L. W. Chen, "On Drag of Evaporating Liquid Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol. 14, pp. 147~154, 1976.
 13. R. Schmehl, "Advanced Modeling of Droplet Deformation and Breakup for CFD Analysis of Mixture Preparation," *Proceedings of ILASS-Europe 2002*.
 14. L. P. Hsiang and G. M. Faeth, "Drop Deformation and Breakup Due to Shock Wave and Steady Disturbances," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, No. 4, pp. 545~560, 1995.
 15. A. A. Amsden, P. J. O'Rourke, and T. D. Butler, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los-Alamos National Laboratory Report No. LA-1560-MS, 1989.
 16. A. P. Watkins, *Three-Dimensional Modelling of Gas Flow and Sprays in Diesel Engines*, Ed. N. C. Markatos, *Computer Simulation for Fluid Flow, Heat and Mass Transfer, and Combustion in Reciprocating Engines*, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 193~237, 1989.
 17. P. J. O'Rourke, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays", Ph. D. Thesis, Princeton University, 1981.
 18. A. D. Gosman and E. Ioannides, "Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fuelled Combustors", AIAA 81-0323, 1981.