

연료분무의 벽면충돌과정 해석에 대한 수치모델링

Numerical Modeling of Droplet/Wall Impingement Process

문 윤 원*, 유 용 옥*, 김 용 모**

Y. W. Moon, Y. W. Yu, Y. M. Kim

ABSTRACT

The droplet/wall impingement processes in the diesel-like environment are numerically modeled. In order to evaluate the predictive capability of the droplet/wall impingement model developed in this study, computations are carried out for two ambient temperature conditions. Numerical results indicate that the present droplet/wall impingement model reasonably well predicts the basic features of the impinging spray dynamics.

주요기술용어 : Droplet/Wall Impingement(액적/벽면충돌), Film(액막), Spray(분무)

Shear Stress(전단응력), Secondary Breakup(2차 액적분열), Collision(액적충돌)

1. 서론

몇몇 연구자들은 직접분사식 디젤엔진에서 액적분무시 연소실 벽면에 액적이 충돌하는 것은 배출가스형성과 성능에 큰 영향을 미친다는 것을 밝혔다^(1,2). 이러한 액적/벽면충돌현상의 영향은 인젝터와 피스톤의 간격이 작은 엔진에서 더욱 중요하다. 대부분의 보어(bore)가 작은 엔진에서는 분사되는 연료의 양이 증가되면서 부하가 크게 걸릴 때 액적/벽면충돌은 피스톤에 액막을 형성하며 이러한 조건에서는 액적/벽면충돌현상은 필수불가결하며 때로는 특별한 이유로 인해 인위적으로 유도할 수도 있다. Werlberger와 Cartellieri⁽³⁾는 부하가 크게 걸린 보어(=85mm)가 작은 엔진에서 분사되는 연료의 약

50%이상이 피스톤에 충돌하는 것을 확인하였으며 수치적 연구에 있어서는 Gonzales 등⁽⁴⁾이 액적/벽면충돌현상은 저온시동에서 실린더 벽에 연료의 축적으로 인하여 매연이 증가하는 것에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 밝혔다. 그러므로 본 연구에서는 액적/벽면충돌현상을 보다 정확하게 해석하여 공해물질의 생성매카니즘을 규명하고 디젤엔진의 최적의 작동조건을 제시하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는 디젤엔진의 계산에 광범위하게 사용되는 KIVA II를 사용하였으며 연료제트의 미립화과정을 고려하기 위해 Reitz의 파동불안정 모델⁽⁵⁾을 사용하였고 액적/벽면충돌과정을 모사하기 위해 액막모델을 적용하였고 수정된 벽합수 및 액적/액막상호작용모델을 적용하였으며⁽⁶⁾

* 한양대학교 대학원

** 정회원, 한양대학교

O'Rourke의 액적충돌모델⁽⁷⁾, stochastic 액적추적모델⁽⁸⁾ 등을 사용하여 액적/벽면 충돌시 분부의 거동과 분포 등을 예측하였고 액적/벽면 충돌 실험결과⁽⁹⁾와 비교하여 본 연구에서 개발한 모델의 예측능력을 검증하였다.

2. 물리 모델

2.1 액적 분열 모델

미립화과정과 액적분열과정을 액체제트에 대해 선형안정성 해석결과를 이용한 Reitz의 파동불안정 액적분열모델(wave instability model)⁽⁵⁾을 사용하였다. 이 방법은 액체의 판성력, 표면장력, 그리고 액체제트에 작용하는 공기역학적 힘의 서로 다른 조합의 영향으로 인한 다양한 미립화영역뿐만 아니라 intact core의 길이를 예측할 수 있다. 이 모델에서의 액적의 평균크기와 분열속도는 다음과 같다.

$$r = \begin{cases} B_0 \Lambda & \text{if } B_0 \Lambda \leq a \\ \min \left\{ \frac{(3\pi a^2 W / 2\Omega)^{0.33}}{(3a^2 \Lambda / 4)^{0.33}} \right. & \text{if } B_0 \Lambda > a \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{da}{dt} = - \frac{(a-r)}{\tau_b} \quad (2)$$

$$\tau_b = 3.726 B_1 a / \Lambda \Omega \quad (3)$$

where $B_0=0.61$, $B_1=10$

여기서 a 는 모액적의 반경이고 W 는 액적과 유동장과의 상대속도이다. 이 모델에서 중요한 매개변수인 가장 빠르게 성장하는 파의 파장, Λ 와 파의 최대성장률, Ω 는 round jet의 표면파동 분산방정식의 수치적 해를 curve fitting하여 얻은 관계식에 의해 각각 결정된다. 액적분열과정에 대한 지배방정식은 미립화과정의 해석에 사용되는 식과 동일하며 더 미세한 액적의 parcel들은 그것의 질량이 분열되기 전의 액적질량의 20%에 도달할 때 생성된다. 미립화과정에서 분열상수는 Reitz⁽⁵⁾에 의해 제안된 값, $B_1=10$ 을 사용하고 액적의 2차 분열에 대해서는 O'Rourke와

Amsden⁽¹⁰⁾에 의하여 제안된 값, $B_1=1.73$ 을 사용하였다.

2.2 액적/벽면 충돌 모델

디젤엔진의 연소장 해석시 액적/벽면 충돌 과정은 매우 중요한 물리적 현상이다. 내연기관에서 만족할만한 공기/연료의 혼합과 연소를 얻기 위해 직접분사나 포트(port)등에 분사하게 된다. 이러한 경우 연료는 완전하게 증발이 이루어지기 전에 연소실내의 벽면, 또는 포트에 충돌하게 되는데 이 때의 공기/연료의 혼합특성, 연소특성 또는 공해가스 배출특성 등이 달라지게 된다^(11,12).

본 연구에서는 Stanton 등⁽⁶⁾이 제안한 액적/벽면충돌모델을 적용하였으며 액적/벽면 충돌 과정을 해석하기 위해 액막의 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식을 풀었으며 또한 액막에서의 연속방정식과 운동량 방정식에서 액적의 액막충돌, Splash 효과, 다양한 전단응력, 피스톤의 가속도, 중력효과, 동압효과 등을 고려하였다.

2.2.1 분무/액막 상호작용모델

액적이 벽면에 충돌할 때의 영역은 벽면에 도달하는 액적과 벽면의 표면조건, 벽면근처에서의 기체장의 경계층의 특성으로 결정되며 또한 벽면충돌영역을 결정짓는 중요한 인자는 다음과 같은 상대적인 벽면의 온도이다.

$$T_B < T_{pa} < T_N < T_{pr} < T_{Leid}$$

where

T_B : the liquid boiling point

T_{pa} : the pure adhesion temperature below which drop adhesion occurs at low impact energy

T_N : the Nakayama temperature at which a drop reaches its maximum evaporation rate

T_{pr} : the pure rebound temperature above which bounce occurs at low impact energy

T_{Leid} : the Leidenfrost temperature⁽⁹⁾

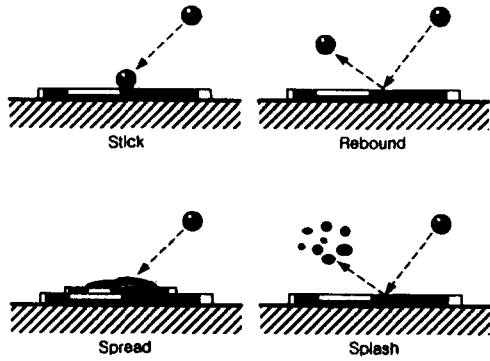


Fig. 1 The various impingement regimes identified in the spray-film interaction model.

벽면의 온도(T_w)가 액적의 끓는점(T_B)보다 낮은 곳에서의 액적의 충돌은 Fig.1에서와 같이 4가지 영역으로 나뉜다(Kolpakov et al., 1985).

Stick영역은 액적이 액막에 거의 원형으로 고착되는데 이러한 원인은 충격에너지가 매우 작고 벽면의 온도가 순수고착온도(the pure adhesion temperature ; T_{pa})보다 낮을 때 발생한다. 이러한 영역의 We(Weber number)수는 $We < 5$ 일 때이며 여기서의 We수($= \rho d_d V_{nd}^2 / \sigma$)는 충돌하는 액적의 법선속도로 계산하며 이러한 기준은 많은 실험의 결과에 기초를 두고 있다^(13,14,15).

Rebound영역은 액막에 충돌하는 액적의 충격에너지가 낮을 때 발생하며 이때의 We수는 $5 < We < 10$ 정도이며 튀어 오르는 액적은 속도의 크기와 방향을 다시 결정해야 한다. 다음의 식은 습표면(wetted surface)에서 튀어 오르는 작은 액적의 속도 식이다⁽¹¹⁾.

$$V_{r_s} = \frac{5}{7} V_{i_s}$$

$$V_{n_s} = -e V_{n_i}$$

여기서 V_{r_s} 는 충돌하는 액적의 접선속도이며 V_{n_s} 는 충돌하는 액적의 법선속도, V_{r_i} 는 튀어 오르는 액적의 접선속도, V_{n_i} 는 튀어 오르는 액적의 법선속도이며 e는 복원계수이고 다음과 같다⁽¹²⁾.

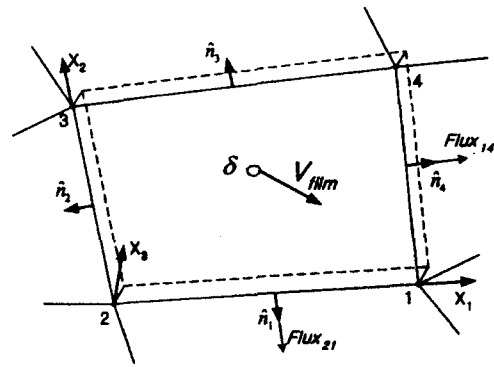


Fig. 2 A typical wall film cell used in the formulation of the film model.

$$e = 0.993 - 1.76\theta_i + 1.56\theta_i^2 - 0.490\theta_i^3$$

여기서 θ_i 는 충돌하는 액적과 벽면의 각도이다 (Fig.1).

Spreading영역은 Stick영역과 비슷하나 높은 We수의 영역에서 발생하며 We수의 범위는 다음과 같다.

$$10 < We < 18.0^2 d_d \left(\frac{\rho}{\sigma}\right)^{1/2} \nu^{1/4} f^{3/4} \quad (4)$$

여기서 ρ, σ, ν 그리고 f는 각각 액적의 밀도, 표면장력, 동점성계수, 진동수이고 식(4)의 우측항은 얇은 액막에 부딪히는 splash의 한계라고 알려져 있다⁽¹⁶⁾.

Splash영역은 매우 높은 충격에너지를 가지고 있을 때 발생하며 We수의 영역은 $18.0^2 d_d \left(\frac{\rho}{\sigma}\right)^{1/2} \nu^{1/4} f^{3/4} < We$ 이다. 충돌이 발생하면 주위에 왕관형태의 분화구모양이 형성되고 jet은 불안정해지며 2차분열이 급격히 일어난다. 이러한 경우 액적이 포트의 표면이나 연소실 벽의 액막의 일부로 침착되기 때문에 액막의 두께, 속도, 온도 등을 계산하여야 한다. splash영역에서 2차 분열에 의해 발생한 액적들의 속도 등은 Stanton 등⁽⁶⁾이 제안한 방법에 의해 계산된다.

splash 발생시 계산되어야 할 순서는 parcel의 갯수(N_{parcel})와 그 안에 포함된 액적수(N_i), 2차 분열에 의해 액막으로부터 발생한 액적들의 질량, 그리고 액적의 속도이며 각각은 Stanton 등⁽⁶⁾이 제안한 방법에 의해 계산된다

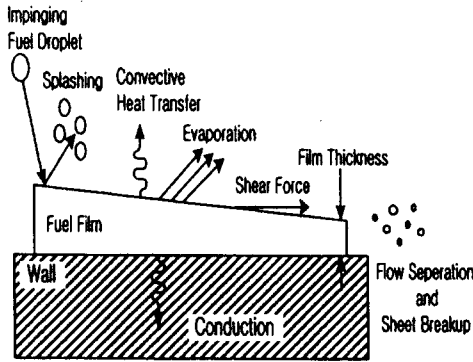


Fig. 3 The major physical phenomena governing film flow

2.2.2 액막모델(Liquid Film Model)

Naber 등^(19,20)에 따르면 액적/벽면 충돌현상을 정확하게 모사하기 위해 액막모델을 포함시켜야 한다. 그러므로 본 연구에서는 액막모델을 적용하여 액적/벽면충돌모델을 해석하였다.

액막에 대한 연속방정식과 운동량 방정식은 각각의 액막 격자에 적용되며(Fig.2) 액막의 두께가 매우 얇다는 가정하에 X_3 방향으로 적분하여 다음과 같은 식을 구성하였다.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{A_{wall}} \sum_{i=1}^{N_{eq}} (\vec{V}_f \cdot \hat{n})_i \delta_i l_i = \frac{S_d}{\rho_l A_{wall}} + \frac{\dot{M}_{vap}}{\rho_l A_{wall}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\delta \vec{V}_f)}{\partial t} + \frac{1}{A_{wall}} \sum_{i=1}^{N_{eq}} \vec{V}_f (\vec{V}_f \cdot \hat{n})_i \delta_i l_i \phi_i \\ &= - \frac{\sum_{i=1}^{N_{eq}} (P \hat{n})_i \delta_i l_i}{\rho_l A_{wall}} + \vec{g} \delta + \frac{M_{tan, g}}{\rho_l A_{wall}} \\ &+ \frac{\sum_{i=1}^{N_{eq}} (\vec{\tau} A_i)}{\rho_l A_{wall}} + \vec{a} \delta \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 A_{wall} 은 벽면 격자의 면적이며 \vec{V}_f 는 액막의 속도, l_i 는 i 번째 측면의 길이이며 S_d 는 생성항이다. 생성항 S_d 는 액막에 충돌하거나 2차 분열로 인해 액막으로부터 분열되는 액적들의 질량속(mass flux)이다. 운동량 방정식(식(6))에서 첫 번째 항은 액막의 두께에 대한 비정상항이며

두 번째 항은 대류운동항이고 ϕ_i 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{1}{1 - \frac{\delta_i}{\delta}} - \frac{\Theta_i}{\delta} \frac{1}{(1 - \frac{\delta_i}{\delta})^2} \quad (7)$$

여기서 δ_i 는 배제두께이고 Θ 는 운동량두께이다. 이것은 액막의 속도분포를 선택하면 쉽게 구할 수 있다. 세 번째 항은 압력항이며 splash 효과에 의한 동압을 고려하였다.

$$P = P_{cell} + p_d \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{with } p_d = & \rho_l \sum_{k=1}^{N_{drop}} V_{n,k}^2 \frac{A_{d,k}}{A_{wall}} \\ & + \rho_l \sum_{j=1}^{N_{splash}} V_{n,j}^2 \frac{A_j}{A_{wall}} \end{aligned}$$

여기서 P_{cell} 은 가스장의 압력이며 $V_{n,k}$ 는 충돌하는 액적의 법선속도이고 $V_{n,j}$ 는 2차 분열에 의한 액적의 법선속도이며 N_{drop} 과 N_{splash} 는 각각 충돌하는 액적과 splash되어 발생하는 액적의 총갯수이다. 또한 $A_{d,k}$ 와 A_j 는 각각 k 번째 충돌하는 액적과 j 번째 2차 분열되는 액적의 면적이다. 네 번째 항은 중력항이다. 중력의 효과로 액막이 연소실내의 벽면을 따라 흐를 때 중요한 역할을 한다. 다섯 번째 항은 충돌과 2차 분열로 인해 발생하는 접선 운동량이며 식은 다음과 같다.

$$M_{tan, g} = \sum_{i=1}^{N_{drop}} (m_i \vec{V}_{t,i}) - \sum_{j=1}^{N_{splash}} (m_j \vec{V}_{t,j}) \quad (9)$$

식(9)에서 첫 번째 항은 충돌하는 액적의 접선운동량의 합이며 두 번째 항은 2차 분열로 발생하는 액적의 접선운동량의 총합이다. 여섯 번째 항은 점성항이며 식은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^{N_{eq}} (\vec{\tau}_i A_i) = \sum_{i=1}^{N_{eq}} (\vec{\tau}_{edge, i} \delta_i l_i) + \vec{\tau}_{wall} A_{wall} + \vec{\tau}_{liq/air} A_{wall} \quad (10)$$

여기서 $\vec{\tau}_{edge}$ 는 액막 격자 모서리를 따라 발생하는 점성전단응력이며 $\vec{\tau}_{wall}$ 은 벽면에 대한 전단응력이고 $\vec{\tau}_{liq/air}$ 는 액막과 기체장과의 전단응력이다. 일곱 번째 항은 피스톤의 움직임으로 발생하는 가속도항이다.

2.2.3 수정된 벽함수(Modified Wall Function)⁽⁶⁾

액막에서의 증발로 인해 발생한 가스장의 속도 때문에 가스장의 난류경계층의 구조가 바뀌기 때문에 벽법칙에서 질량전달을 \dot{M}_{vap} 와 열전달계수 h 가 계산되어야 한다.

경계조건은 Sattlemyer와 Wittig⁽¹⁷⁾에 의해 제안된 액막의 조도(film roughness)에 의해 결정된다.

$$k_s = 2\phi\delta \quad (11)$$

$$\phi = 0.735 + 0.009255\bar{\tau}$$

여기서 k_s 는 액막의 조도이고 $\bar{\tau}$ 는 평균전단응력이며 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\tau} = \tau_w + \frac{\dot{M}_{vap} u_a}{\left[1 + \frac{(\tau_w / (\rho_a u_a))^{0.5}}{x}\right]} \quad (12)$$

여기서 u_a 는 무차원화된 다음과 같은 법선좌표계에서의 가스장의 속도이다.

$$y^+ = \frac{y C_\mu^{0.25} K^{0.5}}{\nu_l} \quad \text{with } K = \frac{\bar{\tau} / \rho_a}{C_\mu^{0.5}} \quad (13)$$

이러한 액막의 조도로 인해 벽법칙의 상수 C 가 변화한다.

$$u^+ = \frac{1}{x} \ln(y^+) + C \quad (14)$$

여기서 C 는 다음과 같이 정의된다.

$$C = 5.15 \quad Re_{\kappa} < 5$$

$$C = 1.5497 + 19.1 \log(Re_{\kappa}) - 14.43[\log(Re_{\kappa})]^2 + 3.3[\log(Re_{\kappa})]^3$$

$$- \frac{1}{x} \ln(Re_{\kappa}) \quad 5 \leq Re_{\kappa} \leq 70$$

$$C = 8.5 - \frac{1}{x} \ln(Re_{\kappa}) \quad Re_{\kappa} > 70 \quad (15)$$

where $Re_{\kappa} = \frac{k_s u_r}{\nu}$

그러므로 위의 식의 조합으로 $y = \delta$ 에서의 전단응력은 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{u_a \rho_a C_\mu^{0.25} K^{0.5}}{\bar{\tau}} = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{\delta C_\mu^{0.25} K^{0.5}}{\nu_a}\right) + C \quad y^+ > y_c^+ \quad (16)$$

$$\frac{u_a \rho_a C_\mu^{0.25} K^{0.5}}{\bar{\tau}} = y^+ \quad y^+ < y_c^+$$

여기서 y_c^+ 는 $y_c^+ = 1/x \ln(y_c^+) + C$ 가 u_a 만족되는 값이고 움직이는 벽에 대해서는 u_a 대신 $|u_a - u_w|$ 가 사용되며 u_a 는 액막의 법선속도이고 u_w 는 벽의 속도이다.

증발과정과 열전달과정을 예측하기 위해 정체온도와 증기농도에 대해 벽함수를 적용하였다. 그러나 Sill⁽¹⁸⁾에 의하면 파동이 있는 액막의 조도는 질량 및 열전달보다 운동량에서 더 큰 영향을 끼친다고 하였으며 또한 Sill⁽¹⁸⁾은 거친 표면에서의 열전달에 대해 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\eta_q = \log\left(\frac{Pr^{0.33}}{Re_{\kappa}^{0.243}}\right) - 0.32 \times 10^{-3} Re_{\kappa} \log(Pr) + 1.225 \quad (17)$$

그러므로 증발이 있는 액막표면에서의 벽함수는 다음과 같다.

$$\frac{-\dot{Q}}{\rho_a u_a \left[i_a - i_s - (1 - Pr_r) \frac{u_a^2}{2} \right]} = \frac{\eta_q c_f}{Pr_r (1 + P \sqrt{\eta_q c_f})} \quad (18)$$

여기서 i 는 정체엔탈피이며 Pr_r 는 난류 Prandtl 수이고 하첨자 'a'는 가스장이며 's'는 액막이다. 또한 변수 c_f 와 P 는 다음과 같다.

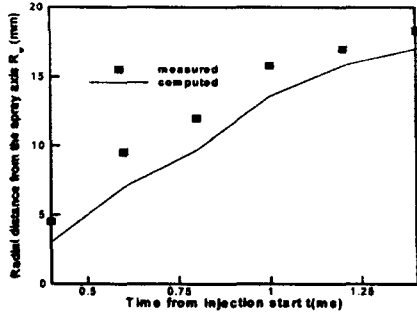
$$c_f = \frac{\bar{\tau}}{\rho_a u_a^2} \quad (19)$$

$$P = 9.0 \left(\frac{Pr}{Pr_r} - 1 \right) \left(\frac{Pr_r}{Pr} \right)^{0.25}$$

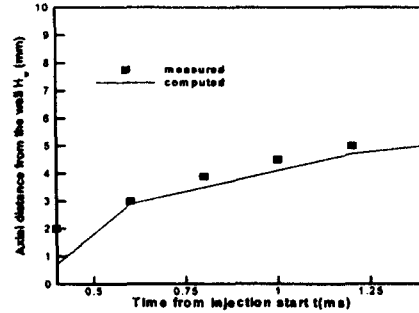
여기에 상용하는 질량전달에 대한 벽함수는 조도가 열전달에 미치는 영향과 유사하다는 가정하에 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{-\dot{M}'_{vap}(1 - y_s)}{\rho_a u_a (y_a - y_s)} = \frac{\eta_m c_f}{Sc_r (1 + P \sqrt{\eta_m c_f})} \quad (20)$$

여기서 η_m 은 η_q 에서 Pr 을 $Sc (=Schmidt$



(a) Spray radius



(b) Spray height

Fig. 4 Comparison of experimental data with calculated results in spray radius and height on the wall

number)로 대체하여 구할 수 있으며 y_s 는 액막 표면온도에서의 평형증발분율이고 y_a 는 y^+ 에서의 공기질량분율이며 Sc_r 는 난류 Schmidt 수이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 액적/벽면충돌모델을 검증하기

Table 1 Test conditions^(a)

Case		Non-evaporating case	Evaporating case
Ambient temperature	T_a (K)	293	700
Ambient density, Ambient Pressure	ρ_a (kg/m ³), P (MPa)	18.5, 1.5	12.3, 2.5
Wall temperature	T_w (K)	293	550
Injection duration	t_{inj} (ms)	1.4	1.9
Injection fuel amount	Q_{inj} (mg)	5.2	7.2
Injection velocity	V_{inj} (m/s)	174	154
Diameter of nozzle	d_n (mm)	0.2	0.2
Spray cone angle	2θ (deg.)	16	16
Impingement distance	Z_w (mm)	24	24
Inclination angle of wall	α_w (deg.)	0	0
Number of mesh		60×1×40	60×1×40
Initial diameter	(mm)	0.2	0.2
Initial droplet temperature	T_p (K)	293	323
Fuel		n-tridecane	

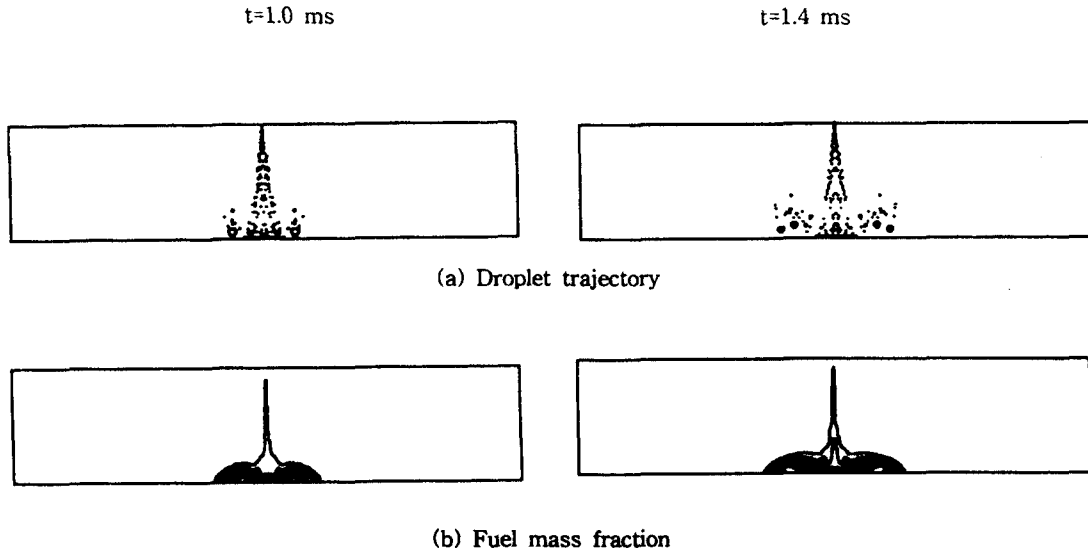


Fig. 5 Instantaneous flowfield for evaporating case

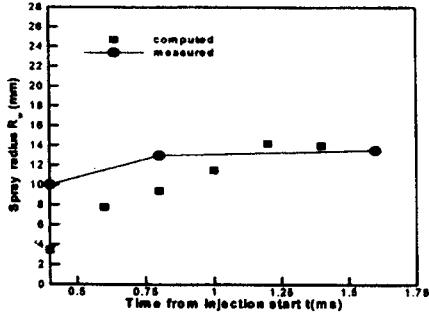
위해 Senda 등⁽⁹⁾의 실험을 채택하였으며 실험조건 및 수치해석조건은 Table 1과 같다. 사용된 연료는 tridecane이며 벽면의 온도가 낮은 경우와 벽면의 온도가 고온인 증발이 있는 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 수치계산영역은 $5\text{cm} \times 2.4\text{cm}$ 이며 액적이 벽면에 충돌하는 거리는 2.4cm 이다. 또한 노즐의 직경은 0.2mm 이며 증발이 없는 경우는 벽면에서의 분무의 반경과 높이를 비교하였으며 증발이 있는 경우는 벽면에서 연료증기의 반경과 분무의 반경을 실험치와 비교하여 보았다.

Fig.4에서는 벽면에서의 증발이 없는 경우에 벽면 충돌 후 시간에 따른 분무반경과 분무높이에 대하여 수치계산 결과와 실험치를 비교하였다. 여기에서 분무의 반경은 축에서부터의 거리이며 분무의 높이는 벽면에서부터의 수직거리이다. 그림에서 보듯이 벽면에서부터의 분무높이는 충돌초기에 약간 과소 예측하나 공학적인 오차범위 내에서 대체적으로 일치한다고 볼 수 있으며 분무의 반경은 전 시간구간에 대하여 과소 예측하는 것을 볼 수 있다. 또한 벽면충돌 초기에 분무의 반경 및 높이의 과소 예측은 본 연구에서 사용한 $k-\epsilon$ 난류모델이 난류분무유동장에

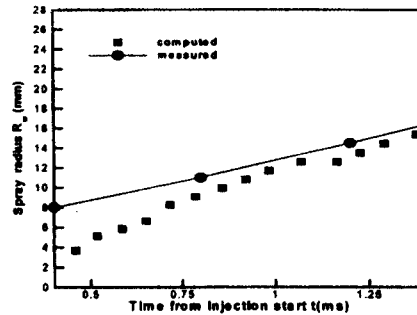
서의 난류와 액적의 상호작용을 정확히 예측하는 데 한계를 가지고 있기 때문이며 난류에 의한 액적 퍼짐 (droplet dispersion)의 과소 예측과 직접적인 관련이 있을 것으로 사료된다.

Fig.5는 증발이 있는 경우의 분무유동장이며 각각 1.0ms , 1.4ms 일 때의 액적분포 및 연료증기의 질량분포를 나타낸다. 수치계산 결과에서 보는 바와 같이 시간이 지날수록 액적의 2차 분열에 의해 액적이 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며 그에 따라 연료증기가 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있으며 연료분무의 벽면충돌과정의 유동특성을 잘 나타내고 있다.

Fig.6은 벽면에서 증발이 있는 경우에 대하여 시간에 따른 분무의 반경과 분무증기의 반경을 나타낸다. 그림에서 보면 분무증기는 분사되고 난 후 벽면에 충돌하는 초기에는 과소 예측을 하나 $t=0.75\text{ms}$ 에서부터 정량적 및 정성적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으나 분무반경은 충돌 초기에 다소 과소 예측하는 것을 볼 수 있다. 또한 액적이 벽에 충돌하면서 벽과 액적간에 열전달이 발생하고 이로 인해 액적의 증발이 활발해져 발생한 연료증기가 난류유동장에 영향을 주어 액막의 형성 및 분포에 영향을 주고 벽에



(a) Liquid phase



(b) Vapor phase

Fig. 6 Comparison of experimental data with calculated results in spray radius on the wall (Spray Dispersion)

충돌한 액적들의 2차 분열로 인해 액적이 쉽게 증발하여 분무반경이 분사후기에 거의 일정해지는 것을 볼 수 있다. Fig.6에 도시된 수치계산 결과에서 벽면충돌 초기에 과소예측하는 것을 볼 수 있는데 이것은 앞에서 지적한 난류분무유동장 해석시의 $k-\epsilon$ 난류모델의 한계와 함께 액적 증발과정에 미치는 압력의 영향을 제대로 고려하지 않았기 때문으로 생각된다. 또한 본 연구에서 사용한 모델의 예측능력을 개선하기 위해서 연료분무의 벽면 충돌과정에 관련된 모든 물리 및 수치모델에 대하여 체계적인 검증은 추후 연구에서 수행하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 액적/벽면충돌모델을 벽면에서 증발이 없는 경우와 증발이 있는 경우에 대해 적용시켜 Senda 등¹⁰⁾이 실험한 결과와 비교하여 보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상온에서 액적/벽면충돌모델을 적용시켰을 때 벽면에서의 분무의 반경 및 분무높이가 약간 과소 예측하나 공학적인 오차범위내에서 대체적으로 일치한다고 볼 수 있으므로 실제 엔진의 분무유동해석에 적용이 가능하다고 사료된다.
- 2) 고온에서 증발이 있는 경우에 액적/벽면모델을 적용하였을 때 분무중기는 약 $t=0.75\text{ms}$ 이후

부터 정량적 및 정성적으로 잘 일치하였다.

3) 벽면충돌초기에 분무의 반경 및 높이의 과소 예측은 분무유동장을 예측하는데 있어 $k-\epsilon$ 난류모델의 한계와 함께 고압상태에서의 증발에 대한 효과를 제대로 고려하지 않은 때문으로 사료된다.

4) 향후 과제로는 피스톤의 보울부분이나 흡기 밸브 등과 같은 형상이 급격히 변하는 부분에 대하여 이상유동(two phase flow)에서의 박리현상으로 인한 sheet breakup 과정과 벽면에서 액막의 증발시 고압 및 고온의 영향과 액적 증발시 복합연료 영향을 고려하여야 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Cartellieri, W.P., et al., "Status Report on a Preliminary Survey of Strategies to Meet US-1991 HD Diesel Emission Standards Without Exhaust Gas After Treatment." SAE Paper 870343, 1987
2. Sakata, I. et al., "Development of a Technique for Direc-Injection Diesel's Formation by Controlling Spray Impingement and Local Swirl by Wall," (In Japanese), Preprints of JSAE, No. 882, Paper No., 882080, p319, 1988
3. Werlberger, P. and Carrellieri, W.P., "Fuel

- Injection and Combustion Phenomena in High Speed DI Diesel Engine Observed by Means of Endoscopic High Speed Photography," SAE Paper 870097, 1987
4. M. A. Gonzalez and R. D. Reiz, "A Study of Diesel Cold Starting Using Both Cycle Analysis and Multidimensional Calculation," SAE Paper 910180, 1991
5. R. D. Reitz, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays," *Atomization and Sprays Technology*, 3, pp. 309~337, 1987
6. Stanton, D.W., and Rutland, C.J., "Multi-dimensional Modeling of Heat and Mass Transfer of Fuel Films Resulting from Impinging Sprays," SAE Paper, 980132, 1998
7. P. J. O'Rourke, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Los Alamos National Laboratory report LA-9069-T, 1981
8. Y. M. Kim, and H. M. Shang, and C. P. Chen, "Studies on Droplet-Turbulence Interaction," *KSME J.*, Vol. 8, No. 4, pp. 364~374, 1994
9. Senda, J., Kobayashi, M., Iwashita, S., and Fujimoto, H., "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SAE Paper, 941894, 1994
10. P. J. O'Rourke, and A. A. Amsden, "The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE Technical Paper, 872089, 1987
11. Matsumoto, S. and Saito, S. "On the Mechanism of Suspension of Particles in Horizontal Conveying : Monte Carlo Simulation Based on the Irregular Bouncing Model," *J. Chem. Engng., Japan*, Vol. 3, pp. 83-92, 1970
12. Bai, C., and Gosman, A.D., "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," SAE Paper 950283, 1995
13. Rodrigues, F. and Mesler, R., "Some Drops Don't Splash," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 106, No.2, pp.347-352, 1985
14. Walzel, P. (1980) Zeteilgrenze beim Tropfenprall, *Chem.-Ing.-Tech.* 52(4).
15. Jayarantne, O.W. and Mason, B.J., "The Coalescence and Bouncing of Water Drops at an Air/Water Interface, *Proc. R. Soc. London*, Vol. A 280, pp. 545-565, 1964
16. Yarin, A.L. and Weiss, D.A., "Impact of Drops on Solid Surfaces: Self-Similar Capillary Waves, and Splashing as a New Type of Kinematic Discontinuity," *J. Fluid Mech.*, Vol.283, pp.141-173, 1995
17. Sattelmeyer, T. and S. Wittig, "Performance Characteristics of Prefilming Airblast Atomizers in Comparison with Other Airblast Nozzle," *Encyl. of Fluid Mechanics*, Vol. 8, 1989
18. Sill, K.H. Wärme- und Stoffübergang in turbulenten Strömungsgrenzschichten längs verdunstender welliger Wasserfilme, Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Thermische Stömungsmaschinen, 1982
19. Naber, J.D., "Droplet Impingement on a Heated Surface," Ph. D Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1992
20. J. D. Naber, and R. D. Reitz, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE Paper 880107, 1988