

# 액막형성을 고려한 분무-벽 상호작용에 대한 모델

이 성 혁\* · 유 흥 선\*\*  
(2000년 2월 26일 접수)

## Modeling of Spray-Wall Interactions Considering Liquid Film Formation

Seong Hyuk Lee and Hong Sun Ryou

**Key Words :** Spray Impingement(분무충돌), Liquid Film(액막), Diesel Engine(디젤엔진), Splash(스플래시)

### Abstract

The main purpose of this article is to propose and assess a new spray impingement model considering film formation, which is capable of describing the droplet distribution and film flows in direct injection diesel engines. The spray-wall interaction model includes several mathematical formulae, newly made by the energy conservation law and some experimental results. The model consists of three representative regimes, rebound, deposition and splash. In addition, the film flow is described in the present model by solving the continuity and momentum equations for film flows using the integral method. To assess the new spray impingement model, the calculated results using the new model are compared with several experimental data for the normally impinging diesel sprays. The film model is also validated through comparing film radius and thickness against experimental data. The results show that the new model is generally in better agreement with experimental data and acceptable for prediction of the film radius and thickness.

### 기호설명

$C_w$  : 액적의 직경비(=  $D_d/D_b$ )  
 $D$  : 액적직경  
 $m$  : 질량  
 $N$  : 액적들의 개수  
 $Oh$  : 액적의 Ohnesorge 수 (=  $\mu_d / \sqrt{\rho_d \sigma_d D_b}$ )  
 $Re$  : 액적의 레이놀즈수 (=  $\rho_d D_b v_{bn} / \mu_d$ )  
 $R_g$  : 충돌영역의 반경  
 $u_r$  : 반경방향의 액막속도  
 $V$  : 액적의 총괄속도  
 $We$  : 웨버수(=  $\rho_d D_d v_d^2 / \sigma_d$ )  
 $\Phi$  : 점성에 의한 액막의 소산에너지  
 $\mu$  : 점성계수

$\rho$  : 밀도  
 $\sigma$  : 표면장력

하첨자  
a : 충돌 후  
b : 충돌 전  
d : 액적  
f : 액막

상첨자  
T : 총괄 속도(total velocity)

### 1. 서론

분무와 벽과의 충돌에 의한 상호작용현상은 공학적으로 중요한 다양한 영역에서 발생하며 이에 대한 연구는 매우 중요한 것으로 잘 알려져 있다. 특히 소형-고속 직접분사식 디젤엔진에서 충돌분무의 거동과 벽면의 액막 형성은 연료의 기화에 의한 혼합기 형성에 영향을 미치며, 디젤엔진의

\* 중앙대학교 생산공학연구소  
\*\* 회원, 중앙대학교 공과대학 기계공학부  
Email : cfdmec@cau.ac.kr  
TEL : (02) 820-5280 FAX : (02) 814-9476

저온 시동 시 발생하는 불연소 탄화수소는 환경오염의 주범으로 인식되고 있다. Gonzalez 등<sup>(1)</sup>은 저온 시동 시 발생하는 불연소 탄화수소의 중요성을 언급하고 이에 대한 해석을 수행한 바 있다. 따라서 저온 시동 시 발생하는 오염물질을 억제하고 더욱 효과적인 엔진설계를 위해서 분무-벽 상호작용과 벽면의 액막 거동의 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다.

과거에는 실험적 방법이 엔진 최적화에 가장 편리한 방법이었다. 그러나 최근 컴퓨터의 비약적 발전에 힘입어 많은 수치 모델들이 개발되면서 시간 및 방대한 비용을 절감하기 위해 수치해석 접근이 활발해지고 있다. 기존의 벽 충돌 모델들<sup>(2-5)</sup>은 Wachters와 Westerling<sup>(6)</sup>의 실험결과에 의존하여 충돌 현상들의 각 영역들을 결정하였기 때문에 높은 충돌에너지에 의한 액적의 스플래시 현상을 근본적으로 모사할 수 없다. 실제로 디젤엔진내의 수력학 영역은 증발-젖음 영역(evaporative-wetting regime)이기 때문에<sup>(7)</sup> 라이덴프로스트 이상의 온도를 가진 벽면에 충돌하는 액적의 실험 결과를 사용하는 것은 논리적으로 타당하지 않다.<sup>(8-10)</sup> 상대적으로 저온의 벽면에 충돌하는 액적의 거동은 고온 벽면 충돌과 매우 다른 현상을 나타내기 때문에<sup>(11)</sup> 실제 저온 시동 시 디젤엔진내의 충돌현상을 효과적으로 모사하기 위해서는 증발-젖음 영역에서 수행된 충돌실험에 기초하여야 한다. 최근 스플래시 현상을 모사할 수 있는 모델개발에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.<sup>(8-10)</sup> 국내에서는 Lee와 Ryou<sup>(12)</sup>가 최근 개발된 충돌 모델들의 성능을 검증하는 연구를 수행한 바 있으며 스플래시 현상을 고려한 모델이 디젤분무현상을 더욱 효과적으로 예측함을 보인 바 있다. 김홍석과 성나원<sup>(13)</sup>은 UMIST에서 개발한 PARK 모델<sup>(2)</sup>을 사용하여 디젤엔진내의 분무특성을 고찰한 바 있다. 그러나 대부분의 국내 연구들은 기존에 개발된 모델들을 사용하는 데에 국한되어 있으며 모델들의 문제점을 보완하거나 보다 효과적인 새로운 모델을 개발하는 연구노력은 미진한 상태이다. 따라서 기존의 고온벽면의 충돌실험을 기초로 한 모델들의 문제점을 지적하고 저온 시동 시 디젤기관내의 분무충돌현상을 효과적으로 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것은 매우 중요하다.

본 연구의 주 목적은 상대적으로 저온인 경우, 젖은 벽(wetted wall)에 충돌하는 분무거동해석을 위한 수치모델을 제안하고 액막 형성 및 거동에 대한 모델을 개발하는 데에 있다. 여기서 '저온 벽'의 의미는 연료의 비등점온도이하의 벽면온도를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 개발된 모델은

주로 저온 시동 시 발생하는 벽면 액막(wall film)과 충돌하는 분무 액적 간의 상호작용을 규명하는데에 적용 가능하다. 새 충돌모델은 Bai와 Gosman<sup>(9)</sup>에 의해 언급된 액적 충돌 시 발생하는 7가지 현상을 기초로 하여 반동, 부착 및 스플래시 영역들을 대표영역으로 설정하였고 에너지 보존식을 기초로 하여 액적의 속도에 대한 새로운 수식을 개발하였다. 또한 충돌 후 벽면에 생성되는 액막 거동을 모사하기 위해 액막의 지배방정식들을 적분하여 해석하였다. 본 연구에서 계산된 결과는 다양한 실험결과와 상호 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 분무충돌모델

일반적으로 분무-벽 충돌모델을 개발하기 위해서는 충돌현상에 대한 영역을 선정하고 이에 대한 영역임계기준(regime criteria)을 결정하여야 한다. 본 연구에서 제안되는 모델은 앞서 언급한 바와 같이 증발-젖음 영역 즉 연료의 비등점이하의 온도를 가진 벽면에 대한 분무충돌현상에 국한되어 개발되었다. 일반적으로 젖음 영역에서는 일반적으로 반동, 퍼짐(부착) 그리고 스플래시 현상이 발생하므로 본 모델은 이 세 가지의 영역을 대표영역으로 선정하였다. 본 모델의 부착영역과 스플래시 영역사이의 임계기준은 Mundo 등<sup>(14)</sup>에 의한 실험에 기초하여 다음과 같이 결정하였다.

$$K = Oh \cdot Re^{1.25} = 57.7 \quad (1)$$

여기에서 K는 충돌에 대한 무차원 파라미터이다. 한편 벽면에 형성하는 액막에 기여하는 액적의 영향을 나타내기 위해 Bai와 Gosman의 방법<sup>(9)</sup>을 이용하였다. 충돌 전 액적에 대한 스플래시된 액적의 질량비  $r_m$ 은 다음과 같다.

$$r_m = m_a / m_b = 0.2 + 0.9 p \quad (2)$$

여기서 p는 0과 1 사이의 균일한 무작위수(random number)를 나타낸다. 또한 충돌 후 조각지는 액적 수는 실험결과<sup>(7)</sup>를 사용하였으며 충돌 후 액적 질량은 질량 보존식에 의해 결정된다. 충돌 후 스플래시 되는 액적들의 속도성분을 결정하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 에너지 보존식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} m_b V_b^2 + \pi \sigma_d D_b^2 - \int_0^{t_e} \int_{V_f} \Phi dV_f dt \\ & = \frac{1}{2} m_a V_a^2 + \pi \sigma_d D_a^2 N_{eject} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $V_f$ 는 액적이 원형 평판의 형태로 퍼졌을 때의 체적을 나타낸다. 위 식에서 좌변의 첫째, 두 번째 항들은 충돌 전 액적들의 운동에너지와 표면장력에너지를 나타내며 충돌 시 점성에 의해 소산되는 에너지를 나타내는 마지막 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_0^{t_e} \int_{V_f} \Phi dV_f dt \approx \mu_d (v_{bn} / \delta_f)^2 \pi d_{sp} \delta_f t_e / 4. \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하여 최종적인 에너지 보존식을 총괄 웨버수에 대한 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$We_a^T = \frac{C_w We_b^T}{r_m} - \left( \frac{4.5 C_w We_{bn} \gamma_{max}^4}{r_m Re_{bn}} - \frac{12 C_w}{r_m} \right) - 12 \quad (5)$$

여기서  $\gamma_{max}$ 는 충돌 전 액적 질량에 대한 스플래시가 발생할 때의 액막디스크(film disc)의 직경비를 나타낸다. 본 연구에서는 스플래시 발생시 크라운 형성순간에 액적이 떨어져 나간다고 가정하였고 Yarin 과 Weiss<sup>(15)</sup>에 의한 실험적 고찰로부터  $\gamma_{max}$ 는 2.0으로 처리하였다. 한편 벽에 접선방향의 액적 속도는 크라운의 접선속도와 동일하다고 가정하였다. Yarin 와 Weiss<sup>(15)</sup>의 크라운 반경식을 이용하여 속도에 관한 식을 유도하였으며 최종적인 액적 접선속도는 다음 식에 의해 결정된다.

$$v_f = 0.452 K_f \cdot Re_{bn}^{1/8} \cdot v_{bn} / \sqrt{\Psi} \quad (6)$$

여기서  $\Psi$ 는 액적의 거주시간(residence time)에 대한 스플래시 발생 시간의 비를 나타내며  $K_f$ 는 마찰계수를 나타낸다. 이 값은 실험고찰에 근거하여 0.81에서 0.91 사이의 무차원수를 사용하였다. 따라서 식 (5)와 (6)을 사용하여 충돌 후 액적들의 속도성분과 스플래시 각(angle)을 결정할 수 있다. 보다 구체적인 유도과정은 참고문헌<sup>(16)</sup>에 자세하게 나타나 있다.

### 2.2 액막형성모델

Nagaoka 등<sup>(17)</sup>은 실험결과를 통해 얻어진 상관식들을 이용하여 소위 렌즈모델을 제안하였다. 그러나 그들의 모델은 비정상적인 액막 모델을 모사하기 어려울 뿐만 아니라 액막의 접선방향으로의 비정상적 거동을 효과적으로 모사하기 어렵다. 그 이유는 중력과 표면장력과의 평형식으로부터 액막의 형상을 결정하기 때문이며 액막이 단지 벽면에 부착된다고 가정하였기 때문이다. Hong 등<sup>(18)</sup>은 이들의 모델을 수정하여 비정상적인 액막의 형상 변화(액막 반경과 두께)를 계산한 바 있다. 그러나 이 모델 역시 액막 반경이 매우 하향 예측 됨을 볼 수 있었으며 보다 효과적인 예측을 위해서는 액막의 운동학적 고려가 필요하다는 것을 지적한 바 있다.<sup>(18)</sup> 본 연구에서는 비정상 액막 거동을 보다 효과적으로 예측하기 위한 액막 모델을 제안한다. 액막 모델은 앞서 언급된 새로운 충돌모델을 바탕으로 개발되었다. 충돌에 의해 벽면에 형성되는 액막의 질량은 다음과 같이 두 가지 요인의 합으로 결정된다.

$$m_{rem} = \sum_i N_i \frac{\rho_{d,i} \pi D_{b,i}^3}{6} + \sum_i N_i (1 - r_m) \frac{\rho_{d,i} \pi D_{b,i}^3}{6} \quad (7)$$

여기서 우변에서 첫째 항은 충돌모델에서 부착영역 내에 포함되는 액적들의 질량을 나타내며 두 번째 항은 스플래시에 의해 액막에 포함되거나 제거되는 액적들의 질량을 나타낸다. 액적 충돌 후 액막의 움직임을 모사하기 위해 본 모델에서는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 두 가지의 과정을 고려하였다. 첫째는 중력과 표면장력 간의 상호작용에 의한 초기 액막의 형성 과정이다. 이 과정은 Hong 등<sup>(18)</sup>에 의해 제안된 모델을 사용하여 처리하며 벽면에 형성된 액체연료의 질량을 기초로 하고 중력과 표면장력과의 상호작용을 고려함으로써 임의의 시간에서 액적 거주시간동안 형성된 액막의 두께와 반경을 다음과 같이 결정한다.<sup>(18)</sup>

$$\frac{h_f}{2r_f} = 0.0177 E_0^{-0.51} \quad (8)$$

$$r_f = \sin \phi \sqrt[3]{\frac{3V_f}{\pi(2 - 3\cos \phi + \cos^3 \phi)}} \quad (9)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{1 - (h_f / r_f)^2}{1 + (h_f / r_f)^2} \right) \quad (10)$$

Table 1 Specifications of test cases

Test Cases	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Impingement Distance[mm]	24	34	24	25	30
Gas Pressure [MPa]	1.5	1.5	1.5	0.2	0.1
Nozzle Diameter[mm]	0.3	0.3	0.2	0.25	0.22
Injection Pressure[MPa]	14	14	13.8	30	26
Injection Duration Time [ms]	1.2	1.2	1.3	2.85	1.0
Reference	[25]	[25]	[26]	[27]	[28]

$$\delta_f = \frac{m_{rem}}{\rho_d \pi r_f^2} \quad (11)$$

여기서  $h_f$  는 Eotvos 수를 함수로 하는 렌즈형상의 액막 두께를 나타내며  $\phi$  는 기하학적 형상관계식을 나타낸다.<sup>(17)</sup> 본 연구에서 개발한 모델은 렌즈형상이 아닌 원형관 형상으로 가정하였기 때문에 액막 두께는 식 (11)과 같이 결정된다. 위 관계식들을 이용하여 거주시간동안의 액막 형상을 결정한다.

액막의 거동모사를 위한 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 얻어진 액막의 초기 형상을 기초로 액막의 운동을 나타내는 것이다. 첫 단계에서 결정된 액막의 초기 형상은 거주시간동안 형성되며 거주시간 이후부터 임의의 계산시간단계까지 액막 속도에 의해 시간에 따라 반경방향으로 이동한다고 가정하였다. 이때 사용되는 액막 속도는 식 (6)에 의해 결정되며 액막의 연속방정식과 운동량방정식계산에 이용된다.

한편 액막 방정식은 축대칭 경계층유동으로 가정하여 얻어지며 가스경계층유동과 액막과의 상호작용은 무시하였다. 또한 임의의 시간단계(time step) 내에서 액막 유동은 준정상상태(quasi-steady state)에 있다고 간주하였다. 액막의 연속방정식과 운동량방정식들은 계산의 단순성을 위해 액막 두께방향으로 적분하였으며<sup>(19)</sup> 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{d}{dr} \int_0^\delta r u_r dy + r u_{r,\delta} \frac{d\delta}{dr} = \frac{g_l r}{\pi R_g^2 \rho_l} \quad (12)$$

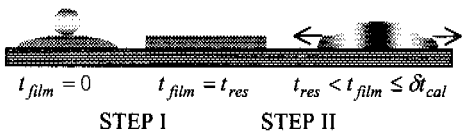


Fig. 1 Schematic diagram of the present film model

$$\frac{d}{dr} \int_0^\delta \frac{u_r^2}{2} dy + \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \int_0^\delta r^2 u_r^2 dy + u_{r,\delta}^2 \frac{d\delta}{dr} = \frac{g_l}{\pi R_g^2 \rho_l \delta} \int_0^\delta u_r dy + \frac{P_r}{\rho_l} \frac{d\delta}{dr} + \frac{\tau_\delta}{\rho_l} \frac{\tau_p}{\rho_l} - \frac{\delta}{\rho_l} \frac{dP_g}{dr} \quad (13)$$

여기서  $g_l = 2\pi \rho_l r \int_0^\delta u_r dy$  이며 액막은 프란틀의 1/7 법칙을 따른다고 가정하였다. 위 식들에서 하첨자  $r$  과  $\delta$  는 반경방향 즉 벽면에 접선방향의 속도성분과 액막과 가스와의 접촉면에서의 상태를 나타낸다. 따라서 속도분포를 식 (12)와 (13)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\delta}{dr} = f(\delta, u_{r,\delta}, r, \tau_\delta, \tau_p, P_g, P_r) \quad (14)$$

$$\frac{du_{r,\delta}}{dr} = f(\delta, u_{r,\delta}, r, \tau_\delta, \tau_p, P_g, P_r) \quad (15)$$

위 식들의 전단응력 및 압력에 대한 파라미터들,  $\tau_\delta, \tau_p, P_g, P_r$  그리고 형상에 대한  $R_g$  등은 실험고찰에서 얻어진 상관식들을 사용하였다.<sup>(20,21)</sup>

### 3. 수치해석 방법

본 연구에서 사용하는 3 차원 이상유동에 관한 방정식들은 기상의 경우 오일러리안 방정식에 기초하며 액상의 경우 라그랑지안 방식에 의해 유도된다. 또한 난류모델은 압축성 효과를 고려할 수 있는 Reynolds<sup>(22)</sup>의 k-ε 모델을 사용하였다. 유한체적법에 기초하여 이산화 된 방정식들은 대류항 및 확산항의 경우 하이브리드 수식을, 비정상 항들은 오일러의 음함수법을 사용하였다. 액상에 대한 상미분방정식들은 오일러의 음함수법에 의해 처리되었고 비정상유동의 압력장을 해석하기 위해 PISO 알고리즘을 이용하였다. 더 자세한 알고리즘은 참고문헌을 참조하면 된다.<sup>(16)</sup> 한편 벽면에 형성된

액막에 대한 방정식들은 Runge-Kutta-Fehlberg 방법을 사용하여 해석하였다. 한편 액적 미립화 모델은 Reitz 와 Diwakar 의 모델<sup>(23)</sup>을 사용하였고 액적 용합과 충돌에 대한 모델은 O'Rourke 의 모델<sup>(24)</sup>을 사용하였다.

4. 해석결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 충돌모델을 검증하기 위해 비증발 충돌분무에 대한 수치해석을 수행하였다. Table 1 은 상호 비교되는 실험 조건들을 나타내고 있다. Cases 1~4 에서는 주로 충돌분무의 거시구조(overall structure)에 대해 해석한다. 즉 충돌 후 벽 분무(wall sprays)의 반경과 높이에 대해 실험값과 상호 비교한다. 특히 Case 4 의 경우 벽에 형성되는 액막의 두께와 반경에 대해 계산결과와 Saito 등<sup>(27)</sup>의 결과가 상호 비교된다. 한편 Case 5 는 충돌분무의 내부구조(internal structure)에 대해 해석하기 위한 것이며 벽 근처영역과 정체 영역에서의 국부적 액적 크기와 속도 그리고 기상 속도 등을 실험 결과와 상호 비교한다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용된 계산격자는 x, y 그리고 z 방향으로 각각 50×50×40 으로 구성되어 있으며 이것은 Lee 와 Ryou<sup>(12)</sup>에 의해 수행된 격자의존성 시험에 근거한 것이다. 계산에 사용된 시간단계는 10 μs 이며 Case 1 과 2 의 경우 총 분사시간에 대해 50000 개의 액적 parcel 들이 분사된다. 본 연구에서 사용된 액체 미립화 모델<sup>(23)</sup>에서는 노즐직경과 동일한 액적 직, 볼륨(blob) 개념을 사용하여 액체제트의 미립화 과정을 모사한다. 한편 노즐에서 분사되는 속도는 실험조건에서 속도스케줄이 주어진 경우에 대해서는 곡선 맞춤식을 사용한 반면(Case 5) 주어지지 않는 경우는 오리피스 식을 사용하였다(Cases 1~4).

4.1 벽 분무의 거시구조에 대한 해석

앞서 언급한 바와 같이 Cases 1~4 는 충돌 후 벽면에 생성되는 벽 분무의 거동을 살펴보기 위해 해석되었다. 기존의 많은 연구자들은 벽 분무의 반경과 높이에 대해 사진기법을 사용하여 측정하였으며 이에 대한 물리적 특성을 언급하였다. 여기서 벽 분무의 반경은 충돌지점부터 벽면의 접선 방향 혹은 반경방향으로 진행된 거리를 나타내며 높이는 수직방향으로의 진행거리를 나타낸다. Fig. 3 은 Cases 1 과 2 에 대해 분사 후 0.7 ms 에서의 충돌분무거동을 나타낸 것이며 벽 분무의 성장이 충돌거리증가에 따라 감소함을 알 수 있다.

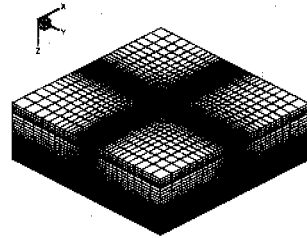


Fig. 2 Calculation domain

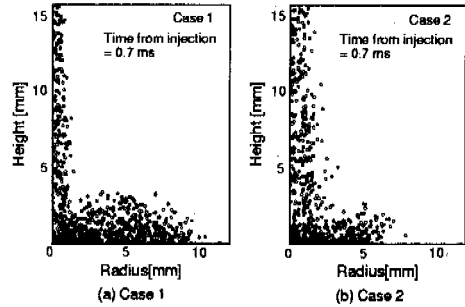


Fig. 3 The predicted spray patterns for Cases 1 and 2

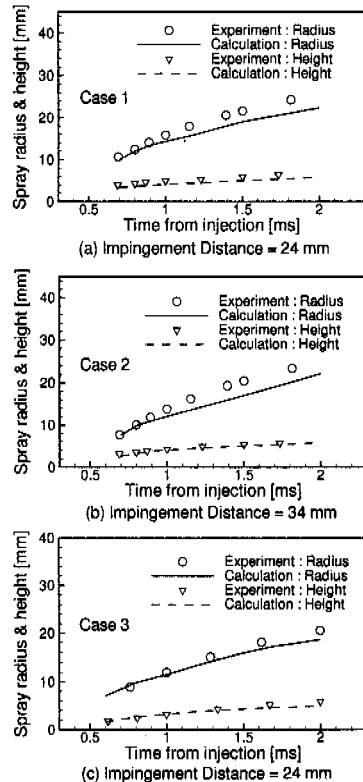


Fig. 4 Comparisons of radius and height of wall sprays with experimental data for Cases 1,2 and 3

이것은 충돌거리가 증가할수록 충돌까지의 시간이 증가하기 때문이며 가스압력과 상호작용에 의해

선단 속도가 감소하기 때문이다. 한편 Fig. 4는 정량적인 비교를 위해 Cases 1~3에서의 벽 분무 반경과 높이를 각각의 실험 결과와 비교한 것이다. 전반적으로 본 연구에서 개발된 충돌모델이 실험 결과에 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Case 1의 경우 분무높이는 실험값과 약 7.6%, Case 2의 경우는 1.6%의 오차를 보이고 있다. 벽 분무 반경의 경우, 충돌초기에서 실험결과와 잘 일치하고 있으나 전반적으로 실험값에 비해 다소 작게 예측하고 있다. Case 1의 경우 12.1%이고 Case 2의 경우는 약 11.6%의 오차를 나타낸다. 이것은 분사말기로 갈수록 점점 증가하고 있는데 충돌 후 쪼개진 액적들의 수 혹은 액적들의 질량예측에 문제점이 있는 것으로 생각된다. 실제로 새 충돌모델에서 사용하는 실험상관관계식은 제한적인 웨버수에 대한 경우에서 적절하기 때문에 이 식을 사용하는 경우 고압 분사인 경우에서 실제보다 작은 액적들을 생성할 수 있다. 따라서 고압분사, 즉 충돌속도가 큰 경우에 대해 보다 일반적인 실험결과가 요구된다. 한편 Case 3의 경우에서도 다른 경우와 거의 동일한 경향을 나타내고 있고 실험값<sup>(26)</sup>과 계산결과와는 매우 잘 일치하고 있다.

Fig. 5는 Case 4의 경우 벽 분무 높이와 반경을 실험결과와 상호 비교한 것이다. 그림에서 본 연구에서 개발된 충돌모델은 실험결과에 잘 일치하고 있다. 따라서 비록 반경방향으로의 벽 분무 진행거리는 다소 하향 예측하고 있으나 본 연구에서 개발된 충돌모델은 충돌분무의 거시구조특성을 예측하는 데에 있어서 효과적임을 알 수 있다. 한편 Fig. 6은 벽에 형성된 벽면 액막에 대한 두께와 반경방향으로의 퍼짐 거리를 나타낸다. 이것은 본 연구에서 제안한 액막 모델의 타당성을 예측하기 위해 수행된 것이며 Saito 등<sup>(27)</sup>의 결과와 상호 비교하였다. 그림에서 액막의 두께는 실험에 비해 다소 상향 예측하고 있으며 약 7.2%의 오차를 나타내고 있다. 또한 반경방향으로의 액막 진행거리 즉 액막 반경은 Hong 등<sup>(18)</sup>에 의해 제안된 이전의 모델과 본 연구에서 제안한 모델을 실험 결과와 상호 비교하였다. 액막 방정식을 이용하여 계산한 경우 사용하지 않은 경우에 비해 액막 반경을 크게 예측하고 있으며 이것은 실험결과와 잘 일치하고 있다. 이 결과를 통해 액막 방정식을 고려함으로써 액막의 분포 혹은 움직임을 더욱 효과적으로 예측한다는 것을 알 수 있다. Hong 등<sup>(18)</sup>의 이전 액막 모델은 액막내의 운동량변화를 무시하고 벽면부착영향만을 고려하기 때문에 반경방향의 액막 움직임을 실제보다 매우 작게 예측하게 된다. 그러므로 액막 거동을 효과적으로 모사하기 위해서

는 액막 방정식의 고려는 필수적이다. 한편 액막 거동 예측에 있어서 시간이 경과할수록 액막의 반경이 작게 예측되는 것은 연속충돌효과를 고려하지 못하기 때문이다. 또한 본 연구에서 제안된 액막 모델은 각 시간단계마다 중력과 표면장력과의 상호작용에 근거하여 초기 액막의 형상을 결정하기 때문에 액적들의 거주시간동안 액적 충돌에 의한 액막의 운동량변화가 무시된다. 따라서 연속충돌에 의한 액막 거동변화를 효과적으로 모사할 수 있는 모델수정이 필요하며 액막 형성에 대해 더욱 정교한 모델 개발이 요구된다. 한편 제안된 액막 모델은 이후에 다양한 실험결과와 상호 비교됨으로써 일반적인 타당성을 확보할 필요가 있다. 또한 본 연구에서 제안된 액막 모델은 축 대칭 가정에 기초하기 때문에 수직 충돌 분무인 경우에만 적용이 가능하다는 제한성을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 액막 모델은 다양한 충돌각도에서 분무거동예측이 가능하도록 확장되어 개발되어야 한다.

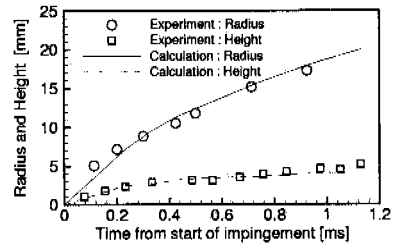
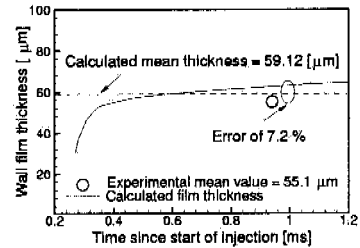
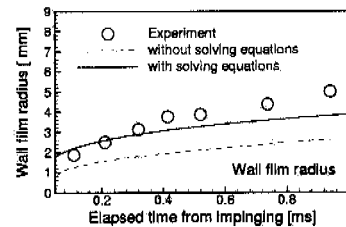


Fig. 5 Comparison of spray height and radius with experimental data for Case 4



(a) Averaged film thickness



(b) Wall film radius

Fig. 6 The predicted thickness and radius of wall films

4.2 벽 분무의 내부구조에 대한 해석

실제로 대부분의 많은 연구들은 주로 충돌 후 발달하는 벽 분무의 거시구조에 국한하여 수행되어왔으며 거시구조에 대한 결과와 상호 비교함으로써 충돌모델의 타당성을 검증하였다. 그러나 더 자세한 분무구조를 파악하기 위해서 내부구조 즉 국부적 위치에서의 액적 크기나 속도 그리고 기상의 속도 등을 비교하는 것은 필수적이다. 왜냐하면, 벽 분무의 내부구조는 실제 디젤엔진 내에서 충돌에 의해 스플래시 되는 액적들의 열전달률 혹은 비정상거동에 영향을 미치게 되며 결과적으로 거시구조특성에 영향을 미치게 되는 요인이기 때문이다. 한편 Arcoumanis 와 Chang<sup>(28)</sup>은 정적 상태에서 벽에 충돌하는 디젤분무의 충돌실험을 수행하고 다양한 영역에서의 액적 속도, 크기 그리고 기상의 속도 등을 PDA(Phase Doppler Anemometer)를 사용하여 측정함으로써 충돌분무의 내부구조에 대한 물리적 특성에 대해 연구한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 새로 개발된 충돌모델을 사용하여 Case 5에 대해 계산된 결과를 실험결과와 상호 비교함으로써 벽 분무의 내부구조에 대한 이해를 증진하고 모델의 타당성을 확보하고자 한다.

Fig. 7은 Arcoumanis 와 Chang의 실험<sup>(28)</sup>에서의 측정위치와 Katsura 등<sup>(25)</sup>에 의해 언급된 벽 분무의 대표 영역들을 나타내고 있다. 그림에서 보는 (1) 영역은 주벽제트영역(main wall-jet region)이고 (2)영역은 정체영역(stagnation region)을 나타낸다. 또한 (3)영역은 헤드 보텍스가 존재하는 하류영역(down-stream region)을 나타낸다. Katsura 등<sup>(25)</sup>의 실험고찰에 따르면 주벽제트영역은 충돌부분의 내부에 존재하며 액적 접선속도 및 운동량이 큰 영역이다. 정체영역은 충돌에 의해 벽으로부터 밀려 올라가는 액적들과 공기에 의해 벽을 향해 유입되는 액적들이 공존하는 영역으로서 준 정상(quasi-steady) 상태의 경우에는 액적의 접선속도가 거의 영(zero)이 되어 정체되는 영역이다.

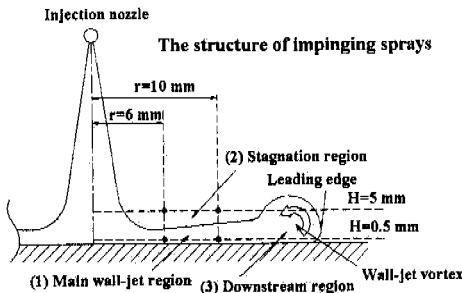


Fig. 7 Measuring locations (Case 5)

마지막으로 하류영역은 벽 제트가 관찰되는 영역이며 준 정상상태로 도달하는 경우, 보텍스에 의한 난류유동과 액적들의 상호작용에 의해 활발한 난류혼합이 일어나는 영역이다. 본 연구에서는 충돌 모델에 대한 성능을 평가하기 위해 주벽제트 영역과 정체영역에 대한 실험결과와 충돌모델의 결과를 상호 비교하였다.

Fig. 8-9는 주벽제트영역과 정체영역에서 액적들의 접선속도와 SMD(Sauter Mean Diameter)를 실험값과 상호 비교한 것이다. 그림에서 계산 결과들이 시간에 따라 진동하는 형태를 가지는 것은 액적들의 평균값을 계산하는 방법에 의해 야기된 것이다. 즉 본 연구에서는 고정위치에서 1 mm의 길이를 가진 정육면체의 제어체적을 설정하였으며 그 안에 존재하는 액적들을 포집하고 주어진 시간 창(time window)내에서 대수 평균함으로써 액적들의 속도 및 평균 직경들을 계산하였다. 본 연구에서는 시간 단계인 10 μs을 시간 창으로 사용하였다.

한편 Fig. 8로부터 본 연구에서 제안된 모델의 결과가 실험결과에 비해 충돌 초기에 다소 상향 예측되고 있으나 정성적으로 유사한 경향을 잘 예측하고 있다. 벽 근처영역에서 액적 접선속도는 종 분사시간에 대해서 준 정상상태에 도달하지 못하고 있는데 이것은 실험에서 언급된 벽 근처영역 특성과 유사한 것이다. 한편, 정체영역에서는 분사 초기에 액적 접선속도가 최대값이 되며 이 값은 시간이 지남에 따라 점차 준 정상상태의 값인 영(zero)으로 접근된다. 이것은 앞서 지적한 바와 같이 공기유입으로 인한 액적 속도성분과 충돌 후에 튀어 오르는 액적들의 속도성분이 서로 상쇄되면서 발생하는 것이며 이로 인해 정체된 액적들이 이 영역에 존재한다. 본 연구에서 제안된 충돌모델의 계산결과는 시간이 지남에 따라 정성적으로 잘 일치하고 있다. 이외에도 정체영역에 비해 벽 근처영역에서 액적들의 운동량이 집중되어 있음을 확인할 수 있다.

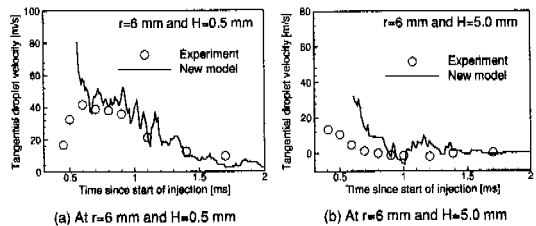


Fig. 8 The tangential droplet velocity (a) at the main wall-jet region and (b) at the stagnation region

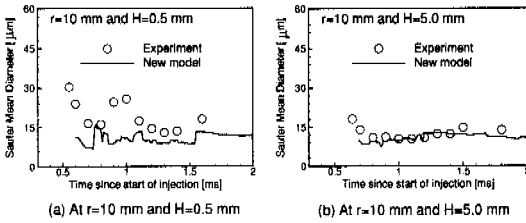


Fig. 9 The SMD profiles (a) at the main wall-jet region and (b) at the stagnation region

Fig. 9는 총돌지점으로부터 10 mm 그리고 벽면으로부터 0.5 와 5.0 mm 떨어진 지점에서 SMD 를 실험값과 비교한 것이다. 전반적으로 벽 근처 영역에서는 실험에 비해 하향 예측하고 있는 반면 정체영역에서는 실험에 잘 일치하고 있다. Arcoumanis 와 Chang<sup>(28)</sup>의 실험결과에 의하면 벽 근처영역에서 액적 크기분포가 1 ms 근처영역에서 일정 시간간격동안 증가하는 섭동형태를 보이고 있다.(Fig. 9(a)) 그들은 이 현상을 액적 분산과 융합 사이의 상호작용에 의한 것으로 설명하고 있으나 벽면근처영역에서 액적 분산 및 융합 그리고 기상과의 상호작용에 대한 명확한 이론적 근거 혹은 어떤 수치모델도 없는 실정이다. 본 연구에서 개발된 총돌모델이 벽 근처영역에서 SMD 의 국부적 증가현상을 모사하지 못하는 것은 자유분무현상에 대해 적용되어왔던 기존의 총돌과 융합모델을 사용하였기 때문에 벽면근처에서 발생하는 액적들의 일련의 과정들을 효과적으로 모사하기 어렵기 때문으로 생각된다. 이와는 달리 상대적으로 벽면에서 멀리 떨어져 있는 정체영역에서는 이러한 섭동현상이 발생하지 않고 있으며 본 연구에서 제안한 모델은 상대적으로 만족한 결과를 보이고 있다. 한편 이전의 연구결과<sup>(12,18)</sup>에서 고온의 벽 총돌 데이터를 이용한 모델들은 스플래시 현상을 근본적으로 모사할 수 없기 때문에 정체영역에서 액적들의 존재를 감지하지 못함을 보인 바 있다. 이와는 달리 본 연구에서 개발된 총돌모델은 정체영역에서의 액적들의 존재를 효과적으로 예측하고 있으며 이는 스플래시 효과를 포함한 총돌모델의 적용이 매우 중요함을 보여주는 것이다.

Fig. 10 은 정체영역에서의 기상의 수직 및 접선 속도를 실험값과 비교한 것이다. 여기서 양의 수직속도 값은 벽에서 수직방향의 값을 나타낸다. Arcoumanis 와 Chang<sup>(28)</sup>은 보텍스 유동의 중심위치를 수직속도 값의 부호가 변화하는 지점 즉, 영(zero)이 되는 지점으로 정의하였다. 실제로 수직속도의 방향이 바뀌는 데에 걸리는 시간은 어떤

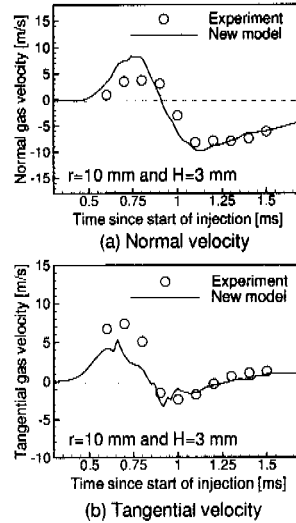


Fig. 10 The tangential and normal components of the gas-phase velocity at the stagnation region ( $r=10$  mm and  $H=3$  mm)

위치에서 벽보텍스(wall vortex)가 지나가는 순간을 나타낼 수 있고 총돌에 의한 보텍스 거동을 파악하는 데에 중요한 의미를 가질 수 있다. 그럼에서 새로운 총돌모델은 약 0.9 ms 에서 보텍스의 중심이 현 측정위치를 통과하는 것으로 예측하고 있으며 이것은 실험결과와 거의 일치하는 것이다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 총돌모델은 총돌에 의한 보텍스의 비정상 유동을 적절하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 한편 물리적으로 수직속도성분의 음의 방향은 주위의 공기가 정체영역으로 유입됨을 의미하며, 유입된 공기는 벽 근처영역에 존재하는 주 벽 제트영역에 영향을 미치게 된다. 전반적으로 새로 개발된 총돌모델은 기상의 수직속도를 효과적으로 예측하고 있다.

기상의 접선속도는 벽보텍스의 반경방향으로의 이동과 밀접한 관련이 있으며 정체영역으로 유입되는 액적들의 거동에 영향을 미치게 된다. Fig. 10(b)에서 본 연구에서 제안된 모델에 의해 예측된 기상의 접선속도는 1.0 ms 이전의 경우 다소 하향 예측하는 반면 이후부터는 정성적으로 잘 일치하고 있다. 또한 그림에서 총돌초기에 시간이 증가할수록 양의 접선속도가 감소하는 것은 벽보텍스의 발생 및 반경방향으로의 이동에 의한 현상이며 약 1.3 ms 이후에는 준 정상상태에 도달함으로써 정체영역에서 기상의 접선속도가 양의 값으로 복귀하게 된다. 전반적으로 본 연구에서 개발된 총돌모델은 액적 총돌현상에 의해 발생하는 기상의 속도변화를 효과적으로 예측하고 있다.



한편 본 논문에서 제안된 모델을 포함한 최근까지 개발된 대부분의 충돌 모델들은 충돌 자체에 대한 현상에 국한되어 있다. 그러나 일반적으로 충돌제트유동의 난류구조는 매우 복잡하며 벽 근처영역에서 비평형성(non-equilibrium)과 비등방성을 가진다. 본 연구에서도 관찰된 바와 같이 분무 충돌 시에는 벽 근처영역에서 액적들이 집중되므로 벽 근처의 난류유동의 적절한 예측은 액적 거동에 매우 중요한 영향을 미치게 된다. 특히 현재 분무거동에 사용되는 등방성 난류 가정은 자유분무거동에서는 타당할 수 있으나 벽 충돌에 의한 벽 근접효과를 효과적으로 모사할 수 없다. 실제 난류섭동성분과 평균기상유동은 액적 거동에 중요한 영향을 미치기 때문에 이에 대한 적절한 예측이 요구된다.

## 5. 결론

본 연구에서 분무충돌 및 액막 형성에 대한 새로운 수치모델이 제안되었으며 타당성 검증을 위해 다양한 실험결과와 상호 비교되었다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 충돌분무 거시구조의 경우, 새로운 충돌모델은 벽 분무의 높이와 반경을 정성적으로 적절하게 예측하였다. 특히 Case 4 의 경우 실험값과 매우 잘 일치하였다. 그러나 Cases 1~3 의 경우에는 반경방향으로의 벽 분무 거동은 실험에 비해 다소 작게 예측하고 있다. 한편 분무의 내부구조의 경우, 새 모델은 국부적인 SMD, 액적 속도 그리고 기상 속도 등을 효과적으로 모사하고 있다. 그러나 벽 근처영역에서의 SMD 분포 예측에 있어서는 다소 문제점이 존재함을 알 수 있다.
- (2) 본 연구에서 개발된 액막 모델을 검증하기 위해 수행된 Case 4 의 경우 계산된 액막 두께와 반경거리는 실험결과와 전반적으로 잘 일치하였다. 특히 액막 방정식을 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비해 실험결과에 더 잘 일치하였으며 이것은 액막 방정식의 사용은 필수적임을 나타내는 것이다. 그러나 더욱 효과적인 예측을 위해서는 본 연구에서 제안된 액막 모델이 수정될 필요가 있으며 일반적인 타당성을 확보하기 위해 다른 실험결과와의 많은 비교가 요구된다.

본 연구에서 개발된 충돌모델은 전반적으로 충돌분무의 내부 혹은 거시구조특성을 효과적으로 예측하고 있다. 그러나 실험결과와 다소 오차를 보이는 부분은 더 적절한 예측을 위해 계속적으로 보완될 필요가 있다. 특히 벽면 근처영역에서의 난류유동과 액적 거동과의 상호 작용에 대한 연구

가 필요하다고 생각된다.

## 후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음.(KRF-99-041-E00075)

## 참고문헌

- (1) Gonzalez, M.A., Borman, G.L. and Reitz, R.D., 1991, "A Study of Diesel Cold Starting Using Both Cycle Analysis and Multidimensional Calculations," SAE910180.
- (2) Naber, J.D. and Reitz, R.D., 1988, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE880107.
- (3) Park, K., 1994, "Development of a Non-Orthogonal-Grid Computer Code for the Optimization of Direct-Injection Diesel Engine Combustion Chamber Shapes," Ph.D. Thesis, The University of Science and Technology in Manchester, UK.
- (4) Guerrassi, N. and Champoussin, J.C., 1996, "Experimental Study and Modeling of Diesel Spray/Wall Impingement," SAE960864.
- (5) Eckhause, J.E. and Reitz, R.D., 1995, "Modeling Heat Transfer to Impinging Fuel Sprays in Direct-Injection Engines," *Atomization and Sprays*, Vol. 5, pp. 213~242.
- (6) Wachterst, L.H., and Westerling, N.A.J., 1966, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State," *Chemical Engineering Sciences*, Vol. 21, pp.1047~1056.
- (7) Naber, J.D. and Farrell, P.V., 1993, "Hydrodynamics of Droplet Impingement on a Heated Surface," SAE930919.
- (8) Senda, J., Kobayashi, M, Iwashita, S. and Fujimoto, H., 1994, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SAE941894.
- (9) Bai, C. and Gosman, A.D., 1995, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," SAE950283.
- (10) Stanton, D.W. and Rutland, C.J., 1998, "Multi-Dimensional Modeling of Heat and Mass Transfer of Fuel Films Resulting from Impinging Sprays," SAE980132.
- (11) Cossali, G.E., Coghe, A. and Marengo, M., 1997, "The Impact of a Single Drop on a Wetted Solid Surface," *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp.463~472.
- (12) Lee, S.H. and Ryou, H.S., "Comparison of Spray/Wall Impingement Models with Experimental Data," *AIAA J. of Propulsion and Power*, (in press).
- (13) 김홍석, 성낙원, 1999, "액적 미립화 모델과 벽면 충돌 모델을 이용한 직접분사식 디젤 엔진의 분무 특성 고찰," 한국자동차공학회논문집, Vol. 7, pp. 35~45.
- (14) Mundo, C., Sommerfeld, M. and Tropea, C., 1995, "Droplet-Wall Collisions : Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process," *Int. J. Multiphase*

- Flow*, Vol. 21, pp.151~173.
- (15) Yarin, A.L. and Weiss, D.A., 1995, "Impact of Drops on Solid Surfaces : Self-Similar Capillary Waves, and Splashing as a New Type of Kinematic Discontinuity," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 283, pp.141~173.
- (16) 이성혁, 1999, "벽에 충돌하는 디젤분무에 관한 모델 개발 및 열전달 해석," 중앙대학교 박사학위 논문, 중앙대학교.
- (17) Nagaoka, M., Kawazoe, H. and Nomura, N., 1994, "Modeling Fuel Spray Impingement on a Hot Wall for Gasoline Engines," SAE940525.
- (18) Hong, K.B., Ryou, H.S., Lee, S.H., and Kang, K.G., "On Modeling of Spray/Wall Interaction and Heat Transfer of Impinging Diesel Sprays," *Combustion Technologies for a Clean Environment, Energy, Combustion and the Environment Book Series*, (in press)
- (19) Siwon, B. and Ennaoui, M., 1991, "Calculating Hydrodynamics Problem for a Liquid Film Flowing Radially on a Flat Horizontal Surface," *Int. J. Numerical Methods*, Vol.13, pp.655~666.
- (20) Schrader, M., 1961, "Trocknung Fuechter Oberflächen mittels Warmluftstrahlen Stromungsforgange und Stoffübertragung," *VDI Forschungsheft*, Vol. 27, pp. 486.
- (21) Dawson, D.A. and Trass, O., 1966, "Mass Transfer in a Turbulent Radial Wall Jet," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 44, pp. 121~129.
- (22) Dawson, D.A. and Trass, O., 1966, "Mass Transfer in a Turbulent Radial Wall Jet," *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 44, pp. 121~129.
- (23) Reynolds, W.C., 1980, "Modeling of Fluid Motions in Engines - an Introductory Overview, in *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*," ed. J.N. Mattavi and C.A. Amann, Plenum Press, NY.
- (24) Reitz, R.D. and Diwakar, R., 1987, "Structure of High-Pressure Fuel Sprays," SAE870598.
- (25) O'Rourke, P. J., 1981, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Ph. D. Thesis, Princeton Univ..
- (26) Katsura, N., Saito, M., Senda, J. and Fujimoto, H., 1989, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," SAE890264.
- (27) Fujimoto, H., Senda, J., Nagae, M., Hashimoto, A., Saito, M. and Katsura, N., 1990, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," *Proc. COMODIA 90 Int. Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in I.C.Engines*, Kyoto, Japan, pp.193~198.
- (28) Saito, A., Kawamura, K., Watanabe, S., Takahashi, T. and Tuzuki, N., 1993, "Analysis of Impinging Spray Characteristics under High-Pressure Fuel Injection," *일본기계학회논문집(B 편)*, 제 59 권, 제 566 호, pp.356 ~361.
- (29) Arcoumanis, C. and Chang, J-C, 1994, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Transient Diesel Sprays," SAE940678.