

충돌분무의 거동에 미치는 벽면곡률의 영향에 대한 수치해석 연구

고 권 현 · 유 흥 선*

중앙대학교 기계공학부

Numerical Study on the Effect of the Wall Curvature on the Behaviors of the Impinging Sprays

Gwon Hyun Ko · Hong Sun Ryou*

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received 27 November 2003 / Accepted 25 March 2004)

Abstract : In this paper a numerical study was performed for the effect of the wall curvature on the behaviors of fuel sprays impinging on the concave Surface. Actually, in the real diesel engines, a piston head has a curved shape for the purpose of the controlling the movement of fuel droplets and the mixture formation. For past decades, although many experimental and numerical works had been performed on the spray/wall impingement phenomena, the curvature effect of impinged wall was rarely investigated. The wall curvature affects on the behaviors of the secondary droplets generated by impingement and the concave wall obstructs the droplets to advance from the impinging site to outward. In present study, the simulation code was validated for the flat surface case and three cases of the different curvature were calculated and compared with the flat surface case for several parameters, such as the spray radius, the spray height and the position of vortex center of gas phase. The simulation results showed that the radial advance of the wall spray and the vortex is decreased with increasing the curvature. It was concluded that the curvature of the impinged wall significantly affects the behaviors of both the gas-phase and the droplet-phase.

Key words : Impinging spray(충돌분무), Wall curvature(벽면곡률), Wall jet vortex(벽제트 보텍스), Splash(스플래시), Vortex center(보텍스 중심)

Nomenclature

k	: turbulent kinetic energy
Oh	: Ohnesorge number
R	: radius of curved wall, m
Re	: Reynolds number
t	: time, s
u, v, w	: velocity components, m/s
u', v', w'	: fluctuation velocity components, m/s
We	: Weber number

ε	: dissipation rate of turbulent kinetic energy
Γ	: diffusion coefficient
μ	: dynamic viscosity, N · s/m ²
ν	: kinematic viscosity, m ² /s
θ	: void fraction
ρ	: density, kg/m ³
σ	: surface tension, N/m

Subscripts

a	: after impingement
b	: before impingement

*To whom correspondence should be addressed.
cfdmec@cau.ac.kr

d : droplet
 f : liquid film
 g : gas phase

1. 서론

고압분무의 벽면충돌현상은 직접분사식 내연기관을 비롯하여 분무 코팅 및 페인팅, 특수금속 생산 등의 다양한 산업분야에서 빈번하게 접하게 되는 매우 중요한 현상이다.^{1,2)} 특히 최근의 직접분사식 디젤엔진개발이 고압인젝터를 이용한 소형화 및 경량화에 집중되고 있으며 이와 관련하여 충돌되는 액적들의 거동을 제어하기 위한 피스톤 보울 형상 개발이 중요시되는 등 연료의 벽면충돌현상은 불가피한 현상으로 인식되고 있다. 이러한 액적의 벽면충돌현상은 혼합기의 형성 및 연소과정에 중요한 영향을 미칠 뿐만 아니라 벽면에 부착된 액적이 미연소 상태에서 배출되어 환경오염을 일으키는 주요 원인으로 제기되고 있으므로 분사연료의 벽면충돌 현상으로 인한 액적들의 거동을 예측하는 것은 매우 중요하다.^{3,4)}

한편 실제 엔진 내부의 피스톤 보울의 형상은 대부분 곡면을 이루고 있으며 이러한 곡면은 분무액적의 충돌 방향이나 속도 성분에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 벽면 곡률은 연소실 내부의 유동장 및 난류장의 특성을 크게 변화시키며 특히 오목면을 지나는 기상유동의 경우 난류 혼합이 증가하여 난류 강도가 증가하게 되는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 벽면의 곡률은 분무 및 기상유동의 특성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 혼합기 형성과정에서 매우 중요한 역할을 하게 된다. 그러므로 디젤분무의 거동특성을 파악하고 피스톤 보울 설계 기술의 개선을 위해서는 충돌벽면이 갖는 곡률이 충돌분무의 특성에 미치는 영향에 대한 물리적 이해가 필수적이라 할 수 있다.

Katsura 등⁵⁾과 Fujimoto 등⁶⁾은 디젤분무가 실린더 벽면에 충돌한 후에 벽을 따라 형성되는 벽분무의 형태 및 침투거리에 대한 정량적인 데이터를 가스의 밀도변화와 충돌거리 및 충돌각도 변화에 대해서 제공하였으며, Arcoumanis와 Chang⁷⁾은 국부적인 액적속도 및 평균직경 등을 PDA 시스템을 이용하

여 측정함으로써 분무충돌현상의 내부구조에 관한 유용한 정보를 제공하였다. 한편, 1980년대 이후로 Naber와 Reitz⁸⁾와 Bai와 Gosman⁹⁾ 등을 비롯한 많은 연구자들이 충돌현상의 모사를 위한 다양한 충돌모델의 개발들을 개발해왔으며 국내에서도 Lee와 Ryou¹⁰⁾ 및 고권현 등¹¹⁾과 같은 많은 연구자들에 의한 수치해석 연구가 수행되었다. 그런데 지금까지 대부분의 실험 또는 수치해석 연구에서는 평판에서의 분무 충돌을 다루어 왔으며 충돌 벽면의 곡률이 충돌 분무의 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 충돌분무의 거동에 미치는 벽면 곡률의 영향을 살피기 위해서 오목면(concave wall)에 충돌하는 디젤분무의 거동을 해석하고 벽분무의 진행 반경 및 높이, 기상 유동의 보텍스 중심 위치의 변화 등과 같은 다양한 파라미터에 대한 특성을 평판의 경우와 비교하였다. 본 연구를 통해서 피스톤 보울 형상 개발을 위한 기초적인 데이터를 제공하고 디젤분무의 거동에 미치는 벽면 곡률의 영향에 대한 물리적 이해를 증진시키는데 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

2. 지배방정식 및 분무모델

본 연구에서 다루는 이상유동은 기상(gas phase)의 경우는 오일러리안 방식을, 액상(liquid phase)의 경우는 라그랑지안 방식을 사용하여 해석하였다. 분무의 미립화와 분열과정에 대해서는 Reitz와 Diwakar¹²⁾의 모델, 액적간 충돌에 대해서는 O'Rourke¹³⁾의 모델을 사용하였으며 분무액적과 충돌벽면과의 상호작용의 해석을 위해서는 최근에 개발된 Lee와 Ryou¹⁰⁾의 모델을 사용하였다.

2.1 지배방정식

기상의 지배방정식을 일반적인 형태로 카테시안 좌표계에 대해 나타내면 다음과 같다.

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

여기서 ρ 는 기상의 밀도, Φ 는 종속변수로써 속도 성분과 난류에너지와 난류에너지 소멸율을 나타낸다. 또한 θ 는 기상의 체적분율이며 Γ_Φ 와 S_Φ 는 각각 확산계수와 생성항을 말한다. 두번째 생성항에서 윗첨자 d 는 액상과의 상호작용에 의한 생성항을 의미한다.

액상의 거동은 액적의 궤적과 운동량방정식에 의해 표현되며 다음과 같다.

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

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

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

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

여기서 S_{ud}, S_{vd}, S_{wd} 는 생성항을 나타내며 운동량 계수 K_d 는 다음과 같이 주어진다.

$$K_d = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_d} \frac{1}{D_d} V_{rel} \quad (4)$$

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

2.2 분무벽면 충돌모델

Lee와 Ryou¹⁰⁾의 모델은 충돌전후의 에너지보존에 근거하여 액적의 반사(rebounding), 부착(deposition), 그리고 스플래쉬(splash) 현상을 해석한다. Lee와 Ryou의 모델에서 부착영역과 스플래시 영역 사이의 임계기준은 다음과 같다.

$$K = Oh \cdot Re^{1.25} = 57.7 \quad (5)$$

여기에서 K 는 충돌에 대한 무차원 파라미터이다. 한편 벽면에 형성하는 액막에 기여하는 액적의 영향을 나타내기 위해서 충돌 전 액적에 대한 스플래시된 액적의 질량비를 다음과 같이 결정한다.

$$r_m = m_a/m_b = 0.2 + 0.9p \quad (6)$$

여기서 p 는 0과 1 사이의 균일한 무작위수(random number)를 나타낸다. 또한 충돌 수 액적 질량은 질량 보존식에 의해 결정되며 충돌 후 스플래

시되는 액적들의 속도성분을 결정하기 위해 다음과 같은 에너지 보존식을 사용한다.

$$\frac{1}{2} m_b V_b^2 + \pi \sigma_d D_b^2 - \int_0^{t_c} \int_{V_f} \Phi dV_f dt \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} m_a V_a^2 + \pi \sigma_d D_a^2 N_{eject}$$

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

$$\int_0^{t_c} \int_{V_f} \Phi dV_f dt \approx \mu_d (v_{bm}/\delta_f)^2 \pi d_{sp} \delta_f t_c / 4 \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 이용하여 최종적인 에너지 보존식을 총괄 웨버수에 대한 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$We_a^T = \frac{C_w We_b^T}{r_m} \quad (9)$$

$$- \left(\frac{4.5 C_w We_{bm} \gamma_{max}^4}{r_m Re_{bn}} - \frac{12 C_w}{r_m} \right) - 12$$

여기서 v_{max} 는 충돌 전 액적 질량에 대한 스플래시가 발생할 때의 액막 디스크의 직경비를 나타내며 Lee와 Ryou¹⁰⁾가 제시한 2.0을 사용하였다. 한편 그들은 벽에 접선방향의 액적 속도가 크라운의 접선 속도와 동일하다고 가정하고 Yarin과 Weiss¹⁴⁾의 크라운 반경식을 이용하여 접선속도에 관한 식을 다음과 같이 유도하였다.

$$v_f = 0.452 K_f \cdot Re_{bn}^{1/8} \cdot v_{bn} / \sqrt{\Psi} \quad (10)$$

여기서 Ψ 는 액적의 거주시간에 대한 스플래시 발생 시간의 비를 나타내며 K_f 는 마찰계수를 나타낸다. 이 값은 실험고찰에 근거하여 0.81에서 0.91 사이의 무작위수를 사용하였다. 따라서 식 (9)와 (10)를 사용하여 충돌 후 액적들의 속도성분과 스플래시 각을 결정할 수 있다. 보다 구체적인 유도과정은 참고문헌¹⁰⁾에 자세하게 나타나 있다.

3. 수치해석 방법 및 조건

유도된 지배방정식은 유한체적법에 기초하여 이

산화 되었으며 대류 및 확산항의 경우 하이브리드 수식을, 비정상항들은 오일러의 음함수법을 사용하였다. 액상에 대한 상미분방정식들은 오일러의 음함수법에 의해 처리되었고 비정상유동의 압력장을 해석하기 위해 PISO 알고리즘을 이용하였다.

본 연구에서는 50, 70 그리고 90 mm의 곡률 반경을 갖는 곡면과 평판으로 충돌하는 분무에 대해서 각각 수치해석을 수행하였다. 평판에 충돌하는 분무는 Katsura 등⁵⁾의 실험 조건과 비교하였으며 이를 바탕으로 곡률의 증가에 따른 충돌 분무의 거동에 대한 특성을 살펴보았다. 모든 경우에서 분사 압력은 최대 14 MPa로 Katsura 등⁵⁾의 제시된 분사 스케줄을 이용하였으며 챔버내 압력은 1.5 MPa이다. 또한 분사 노즐의 직경은 0.3 mm 이며 노즐출구에서 충돌 벽면까지의 거리는 24 mm, 분사 시간은 1.2 ms 이다. 본 연구에서는 격자 독립성 테스트를 통해 52×52×52의 격자를 채택하였다. Fig. 1은 각 경우의 충돌 벽면의 곡률을 비교할 수 있도록 2차원으로 나타낸 격자 그림이다. 한편 계산에 사용된 시간단계는 10 μs이며 분사 시간에 걸쳐 3000개의 액적군(parcel)이 분사된다.

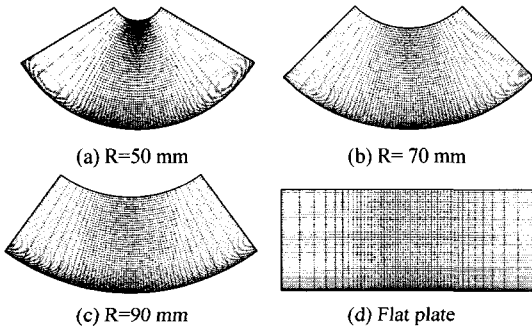


Fig. 1 Curvature shapes of the calculation cases

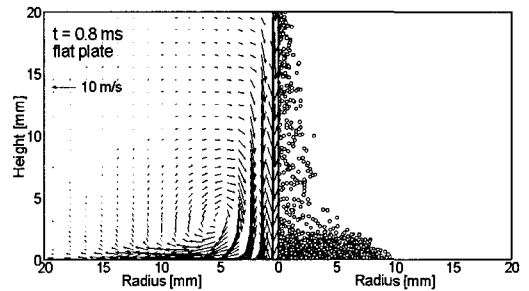
4. 결과 및 고찰

충돌 분무의 거동을 살피는 대부분의 연구에서는 주로 평판으로 충돌하는 경우만을 다루어 왔으므로 곡면에 충돌한 경우에 대해서 직접적으로 비교할 수 있는 실험 데이터를 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 평판에 대한 수치해석 결과를 Katsura 등⁵⁾의 실험 결과와 비교하여 해석 코드의 타당성을 검증하는 동시에 이를 바탕으로 벽면의 곡

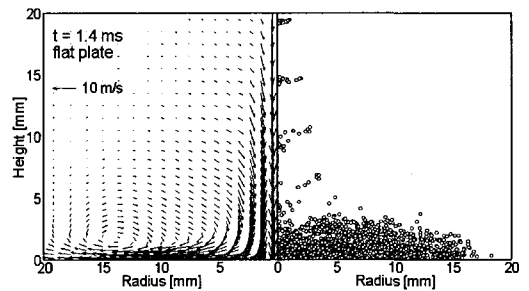
률 증가에 따른 벽분무의 높이 및 반경, 기상 유동의 특성 및 보텍스 중심의 위치 변화 등과 같은 파라미터들에 대한 특성을 살펴으로써 곡면에 충돌하는 분무의 거동 특성을 정성적으로 살펴보고자 한다.

4.1 평판에 충돌하는 분무의 해석

Fig. 2는 평판에 충돌하는 분무에 대한 해석 결과로써 분사 후 0.8 ms와 1.4 ms 경과했을 때의 기상 속도장과 충돌분무의 형상을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 분사 초기에 정지상태로 있던 기상이 분무의 진행에 의해 보텍스를 형성하면서 분무 내부로 유입되는 것을 볼 수 있다. 이렇게 형성된 기상의 보텍스는 분무와 함께 벽을 향해 진행하게 되고 분무가 벽에 충돌하여 반경방향으로 진행됨에 따라 벽 보텍스가 형성되어 반경방향으로 전진하게 된다. 벽 보텍스의 아래쪽, 즉 벽면에서 속도의 크기가 보텍스 위쪽에서의 속도에 비해 매우 큰 것을 알 수 있으며 이것은 충돌한 액적이 반경반향으로 진행하면서 전달되는 운동량이 매우 크기 때문이다. Fig. 3은 충돌분무의 반경과 높이에 대한 계산 결과



(a) At t=0.8 ms after the injection start



(b) At t=1.4 ms after the injection start

Fig. 2 Predicted results of the velocity field and the spray patterns for the flat plate case

를 Katsura 등⁵⁾의 실험결과와 비교한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 분무반경의 경우 시간이 진행됨에 따라 오차가 증가하고 있으나 전반적으로 실험과 잘 일치하고 있으며 분무 높이의 예측에 있어서도 전반적인 경향을 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

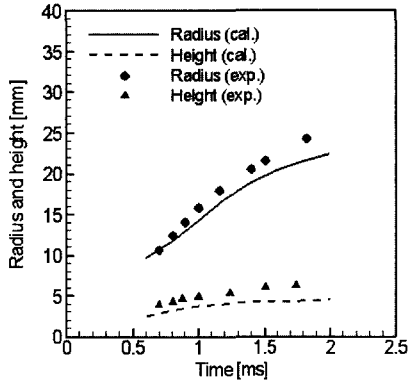


Fig. 3 Comparisons of predicted radius and height of wall sprays with experimental data⁵⁾ for the flat plate case

4.2 벽면 곡률의 영향에 대한 연구

Fig. 4는 곡률반경 $R=90$ mm인 곡면에 충돌하는 분무에 대한 해석 결과로서 기상의 속도장과 충돌 분무의 형상을 나타내고 있다. Fig. 2(b)와 비교해 보면 평판의 경우에 비해 기상의 진행이 다소 지체되는 것을 볼 수 있다. 이것은 오목 벽면을 지나가는 기상의 경우 벽면의 존재가 기상유동의 진행을 방해하는 역할을 하고 있기 때문으로 생각된다. Fig. 5는 벽면 근처의 속도분포에 대한 계산결과를 나타내고 있다. 그림에서 L 은 충돌 축에서 벽면을 따른 거리를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 충돌 축 근처에서는 모든 경우에 있어서 속도분포가 거의 유사한 것을 알 수 있다. 이것은 기상 유동장에 미치는 곡률의 영향이 미처 반영되지 못했기 때문으로 생각할 수 있다. 그러나 충돌 축에서 멀어질수록, 즉 곡률의 영향이 축적됨에 따라 곡률의 변화에 따른 속도분포의 변화가 확연히 나타나고 있다. 충돌축에서 12 mm 떨어진 지점의 결과를 살펴보면 곡률 반경이 감소함에 따라, 다시 말해서 곡률이 증가함에 따라 벽면 근처의 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 오목벽면의 곡률증가가 기상유동의 진행을 방해하는 역할을 하고 있기 때문

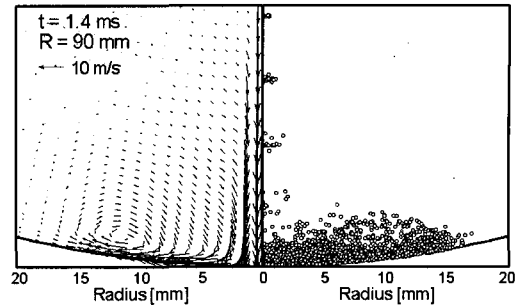


Fig. 4 Predicted results of the velocity field and the spray patterns at 1.4 ms after injection start for the $R=90$ mm case

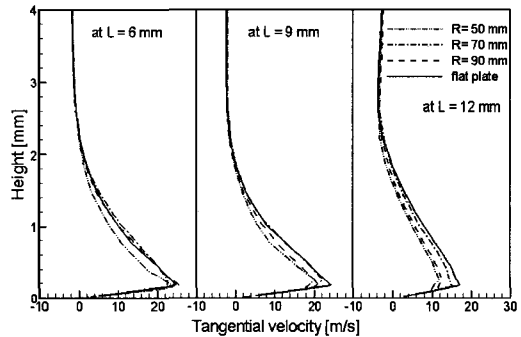


Fig. 5 Predictions of the velocity profile near the wall at 1.4 ms after injection start for the different wall curvatures

으로 생각할 수 있다.

Fig. 6은 기상 보텍스의 중심의 위치변화를 보여 주고 있다. 그림에서 수직위치(normal position)란 벽면으로 부터의 거리를 말하며 반경위치(radial position)은 충돌 축에서 반경방향으로 이동 거리를 말한다. 분무가 진행함에 따라 주변 기상의 유입에 의해 발생하는 보텍스는 벽면을 향해 이동하다가 분무가 벽면에 충돌한 후에 벽면에서 조금씩 멀어지는 경향을 보이고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 수직위치의 경우 곡률에 따른 영향이 미비한 반면에 반경위치는 곡률 반경이 감소함에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다. 한편 Fig. 7은 서로 다른 곡률을 갖는 벽면에 충돌하는 분무의 충돌 후 반경 방향의 진행거리와 벽면에서의 높이에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 그림을 보면 분무 높이의 경우 벽면 곡률변화에 대한 영향이 매우 작지만 분무 반경의 경우 곡률반경이 감소함에 따라 분무의 진행

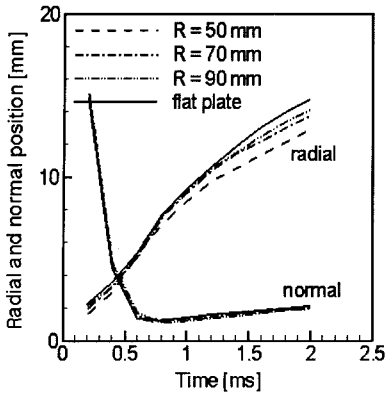


Fig. 6 predictions of the positions of the vortex center for the different wall curvatures

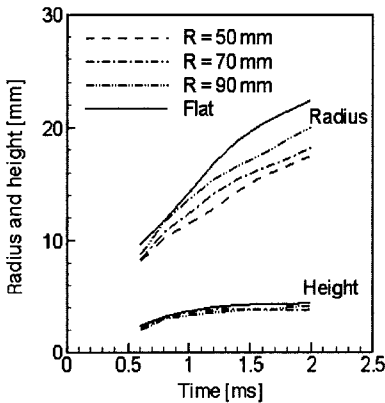


Fig. 7 predictions of the radius and height of the sprays for the different wall curvatures

거리도 감소하는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다. 특히 충돌 축에서의 거리가 증가할수록 이러한 변화가 크게 증가함을 보여주고 있다. 이것은 오목면이 기상 유동장뿐만 아니라 분무액적의 거동에 있어서도 큰 영향을 미치게 됨을 보여준다.

5. 결론

본 연구에서는 충돌분무의 거동에 미치는 벽면 곡률의 영향을 살펴 위해서 오목면에 충돌하는 디젤분무의 거동을 해석하고 벽분무의 진행 반경 및 높이, 기상 유동의 보텍스 중심 위치의 변화 등과 같은 파라미터에 대한 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 분무가 진행됨에 따라 정지상태에 있던 기상이

분무내부로 유입되며 보텍스를 형성하게 된다. 이 보텍스는 분무와 함께 이동하여 벽면에 충돌한 후 반경방향으로 진행하게 된다.

2) 오목면의 존재는 기상 및 액적의 반경방향으로 진행을 억제하는 역할을 하게 되므로 오목면의 곡률반경이 감소할수록 이러한 경향은 증가하게 된다.

3) 충돌면의 곡률반경이 감소함에 따라 분무반경과 보텍스 중심의 반경위치가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 벽면에 수직인 방향으로의 액적 및 기상의 거동에 미치는 곡률변화의 영향은 상대적으로 미비하였다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2001-041-E00026). 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

References

- 1) H. Liu, Science and Engineering of Droplets, Noyes Publications, New Jersey, 1999.
- 2) S. Y. Lee, Atomization of Liquid, Minumsa Co. Ltd., Seoul, Korea, 1996.
- 3) M. A. Gonzalez, G. L. Borma, R. D. Reitz, "A Study of Diesel Cold Starting Using Both Cycle Analysis and Multidimensional Calculations," SAE 910180, 1991.
- 4) J. B. Heywod, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.
- 5) N. Katsura, M. Saito, J. Senda, H. Fujimoto, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," SAE 890264, 1989.
- 6) H. Fujimoto, J. Senda, M. Nagae, A. Hashimoto, M. Saito, N. Katsura, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," Proc. of COMODIA 90, pp.193-198, Kyoto, Japan, 1990.
- 7) C. Arcoumanis, J.-C. Chang, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Transient Diesel Sprays," SAE 940678, 1994.
- 8) J. D. Naber, R. D. Reitz, "Modeling Engine

- Spray/Wall Impingement,” SAE 880107, 1988.
- 9) C. Bai, A. D. Gosman, “Development of Methodology for Spray Impingement Simulation,” SAE 950283, 1995.
 - 10) S. H. Lee, H. S. Ryou, “Development of a New Spray/Wall Interaction Model,” Int. J. of Multiphase Flow, Vol.26, pp.1209-1234, 2000.
 - 11) G. H. Ko, H. S. Ryou, S. H. Lee, “Numerical Study of Impinging Sprays Considering Anisotropic Characteristics of Turbulence,” Transactions of the KSAE, Vol.11, No.3, 2003.
 - 12) R. D. Reitz, R. Diwakar, “Structure of High-Pressure Fuel Sprays,” SAE 870598, 1987.
 - 13) P. J. O'Rourke, “Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays,” Ph. D. Thesis, Princeton University, 1981.
 - 14) A. L. Yarin, D. A. Weiss, “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.