

분무액적과 벽의 상호작용에 대한 연구

Study of Spray Droplet/Wall Interaction

양 회 천*, 유 흥 선**, 정 연 태***
H. C. Yang, H. S. Ryou, Y. T. Jeong

ABSTRACT

The impingement of the fuel spray on the wall within the combustion chamber in compact high-pressure injection engines and on the intake port wall in port-fuel-injection type engines is unavoidable. It is important to understand the characteristics of impinging spray because it influences on the rate of fuel evaporation and droplet distribution etc. In this study, the numerical study for the characteristics of spray/wall interaction is performed to test the applicability and reliability of spray/wall impingement models. The impingement models used are stick model, reflect model, jet model and Watkins and Park's model. The head of wall-jet emanating radially outward from the spray impingement site contains a vortex. Small droplets are deflected away from the wall by the stagnation flow field and the gas wall-jet flow. While the larger droplets with correspondingly higher momentum are impinged on the wall surface and then are moved along the wall and are rolled up by wall-jet vortex. Using the Watkins and Park's model the predicted results show the most reasonable trend. The rate of increase of spread and the height of the developing wall-spray is predicted to decrease with increased ambient pressure (gas density).

주요기술용어 : High-Pressure Injection Engine(고압 분사 엔진), Port-Fuel-Injection Type Engine (포트-연료-분사식 엔진), Impinging Spray(충돌분무), Spray/Wall Impingement Model(분무/벽 충돌모델), Wall-Jet Vortex(벽-제트 와류)

* 정회원, 여수수산대학교 자동차공학과

** 정회원, 중앙대학교 기계공학과

*** 중앙대학교 대학원 기계공학과

기 호 설 명

C_0	: 유량계수
D	: 액적의 직경
$film$: 액막전면(film front)
G_t	: 난류운동에너지 생성항
S	: 지배방정식의 생성항
K_a	: 운동량 전달계수
N	: 액적수
ΔP	: 분사압과 정적 용기내의 압력차이
$scat$: scattering 성분
u, v, w	: 직교곡선 좌표계에서 각 방향 속도성분
V	: 검사체적의 부피
β	: 충돌액적들이 벽의 법선방향과 이루는 각도
θ	: 보이드율
ϕ	: 독립변수
Γ_ϕ	: 확산계수
ρ_d	: 액적의 밀도

상 · 하첨자

n	: 벽면에 대한 법선방향
t	: 벽면에 대한 접선방향
a	: 충돌후의 상태
b	: 충돌전의 상태
d	: 액적의 상태
g	: 기상의 상태

1. 서 론

고압분사 방식의 소형엔진이나 포트-연료-분사식 엔진에서는 운전조건에 따라서 분무액적과 벽면의 충돌현상이 불가피 한데, 분무액적과 벽의 상호작용은 연료와 공기의 혼합 및 연소에 영향을 미치는 가장 중요한 인자중의 하나이다. 분사된 액체연료의 완전한 무화를 위해서는 노즐로부터 일정한 거리가 필요하다. 따라서 고압분사 방식 엔진이 보다 소형화되고 동시에 피스톤 헤드의 연소실 케비티가 작아질수록 보다 많은 액체연료가 벽면에 충돌하여 벽면과 상호작용하게 된다. 포트-연료-분사식 엔진의 시동 초기에는

액체연료가 차가운 흡기다기관에 부착되고, 액적 상태로 연소실내에 유입되어, 점화시까지 연소실 벽에 남아있게 된다. 분무액적과 벽의 충돌은 분무연료의 2차적인 미립화의 유발요인으로, 분무가 벽을 따라 유막을 형성하며 확산되도록 하고, 공기의 유입(entrainment)을 통해 증발과 혼합을 배가시키는 요인이 된다. 그러나 분무액적이 벽에 부딪혀 흡착됨으로써 흡착점 부근에 농한 혼합기를 형성하여 부분적인 연소가 발생하는 것이 다량의 환경 오염물질을 방출하는 원인이 되는 것으로 알려지고 있다.¹⁾ 따라서 대기오염의 주범인 탄화수소(HC), 일산화탄소, 질소산화물, 그을음(soot) 및 매연 등의 방출량을 저감시키고, 소형경량화 되는 엔진의 성능향상을 위해서는 분무와 벽면과의 상호작용에 대한 특성해석이 반드시 필요하다.

벽면에 충돌하는 분무 액적들은 더 작은 액적들로 쪼개지거나, 벽에 부착되거나, 액막을 형성하거나 또는 충돌후 튀겨져 나오게 된다. 일반적으로 이러한 현상들은 벽면의 온도, 벽면의 재질 및 조도, 충돌각 등에 따라 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 또한 연료액적과 벽면의 상호작용은 액적의 선형운동량, 액적의 온도, 웨버수, 액적의 직경 및 주위가스의 속도와 온도, 난류량, 경계층의 두께 등에 영향을 받는다.²⁾ 그러나 이러한 현상들에 대한 이해 및 해석모델의 개발이 충분치 못하여 현재까지도 실험적으로나 수치적으로 연구가 그다지 활발치 못한 실정이다.

분무와 연소실 벽면의 충돌에 관한 연구는 직접 분사식 디젤기관을 중심으로 80년대 이후 본격적으로 여러가지 방향에서 진행되어 왔다. Katsura et al³⁾은 분위기 압력 및 밀도, 충돌거리, 분사압 등의 변화에 따른 디젤연료의 수직충돌 분무의 거동에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Fujimoto et al.⁴⁾은 laser light extinction 방법을 이용하여 벽 부근에서의 액적 수밀도 함수를 결정하였다. 이들은 벽에 충돌하는 디젤분무액적의 SMD는 분무 중심축과 벽부근의 분무가 장자리에서 최대값을 갖는다는 연구결과를 발표하였다. 분무와 벽의 충돌 현상의 매카니즘을 보다 잘 이해하려는 노력으로 Naber et al⁵⁾은 단

일 액적의 뜨거운 벽면 충돌에 대한 실험적 연구를 통해 분열에 의해서 생성되는 액적들의 갯수, 크기 및 속도분포를 조사하였다. 일반적으로 엔진은 광범위한 연소실 내부압력 및 온도범위, 그리고 여러 상황의 도로 여건에서 운전되기 때문에 연소실 내벽의 온도는 공간적으로나 시간적으로 변화가 심하다. 그런데 충돌분무의 물리적 특성들에 대한 연구결과들은 대기압 조건하의 압력 및 온도범위에서의 연구가 대부분이다. 궁극적인 연구목적은 실제 주행조건하에서의 분무와 벽의 상호작용 현상을 규명하는 것이겠지만 가시화 장치의 제작 및 가시창의 오염등의 문제점들로 인하여 위에 언급한 것과 같은 연구가 수행되고 있다.⁶⁾

액적의 벽면충돌을 고려하기 위해 몇가지 접근방법들이 다차원 수치해석 모델들에 도입되어 연구되고 있다. KIVA계열의 코드^{7,8)}에서는 벽에 충돌하는 액적이 벽에 부착되어 구형의 형상을 유지하며 증발되는 것으로 가정하는 모델을 이용하였다. 이 방법에서는 벽면을 따라 형성되는 액막현상을 고려치 못하였으며, 충돌후 액적의 쪼개짐, 튀겨져 나오는 현상들을 고려치 못하였다. Nguyen et al.⁹⁾, Carpenter와 Ramos¹⁰⁾는 벽에 충돌하는 액적들이 입사각과 동일한 각도로 튀겨져 나가는 것으로 가정하며, 접선 및 법선 방향 속도 성분이 보존되는 모델을 도입하였다. 이 경우에도 벽면을 따라 형성되는 액막현상이나 액적의 쪼개짐 현상을 고려치 못하였다. 충돌하는 액체 제트가 비점성이며, 벽과 충돌 제트 사이의 마찰력을 무시할 수 있다면, 질량 및 선형 운동량 보존, 충돌영역에 대한 상세한 해석을 통해서 벽-제트의 폭과 두께를 알 수 있다는 연구결과가 발표되었다.¹¹⁾ Naber와 Reitz²⁾는 비점성 충돌 제트에 대한 상세한 해석보다는 벽-제트의 두께를 질량 및 선형 운동량 보존법칙에 따라 결정하며, 충돌액적들은 벽에 접선방향의 궤적을 갖는 것으로 가정하는 모델을 도입하였다. 이들의 방법에서는 벽과 액체연료사이의 마찰력을 무시했으며 충돌제트의 분산, 벽을 적시는 액막의 계속적인 형성을 고려치 못하였다. 한편 최근에 Bai와 Gosman¹²⁾은 단일 액적 실험

에 근거하여 벽면의 상태에 따라 마른 벽(dry wall)과 젖은 벽(wetted wall)으로 구분하고 각각의 경우에 대하여 서로 다른 분무의 거동을 가정한 모델을 제시하였다. 또한 운동량과 에너지 보존의 개념을 도입하여 충돌후 분무의 속도 등을 결정한 점이 다른 모델들과 구별되는 특징이다. Wang^{13~15)}, Watkins와 Park¹⁶⁾의 모델은 Reitz 계열의 모델과는 달리 개별 액적 충돌실험에 근거하여 충돌전 운동에너지의 크기에 따라 달라지는 분무의 거동을 가정하였다. 충돌전 벽면에 수직인 방향으로의 속도 성분에 의한 웨버수에 따라 충돌후의 분무입자의 거동을 결정하는 방법을 도입하였다.

본 연구는 최근에 들어서 전세계적으로 더욱 강조되고 있는 연료의 효율적인 이용 및 환경 오염문제의 해결에 일조하고자 하는 연구로, 90년대 이전의 수치적연구에서 주로 이용되었던 3가지 분무와 벽 충돌모델과 최근에 개발된 분무와 벽 충돌모델의 적용성 및 타당성을 검증하기 위하여 여러 가지 계산변수에 따라 정적 용기의 벽면에 분무액적이 충돌할 때 액적들의 거동, 유동장 변화 등에 대해 정성적으로 해석하였다.

2. 이론적 해석

2.1 지배방정식

기상에 대해서는 피스톤과 밸브의 압축 및 팽창에 따른 밀도변화를 고려한 형태의 질량, 운동량, 기타의 스칼라 방정식을 이용하였으며, 액상의 지배방정식은 각 액적들의 궤적을 추적하는 라그랑지안 형태의 방정식을 이용하였다. 기상 of 지배방정식을 일반적인 형태로 나타내면 다음과 같다.¹⁷⁾

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta V} \frac{\partial}{\partial t} (\theta \rho \Delta V \phi) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\theta \rho w_R \phi) \\ & + \frac{1}{\Delta \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (\theta \rho \Delta \eta u \phi) + \frac{1}{\Delta \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta \rho \Delta \xi v \phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\theta \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\Delta \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\theta \Gamma_{\phi} \Delta \eta \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\theta \Gamma_{\phi} \Delta \xi \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) + S_{\phi} + S_{\phi}^d \end{aligned}$$

액상의 제적과 운동량방정식은 다음과 같다.¹⁷⁾

$$\frac{d \xi_d}{dt} = u_d, \quad \frac{d \eta_d}{dt} = v_d, \quad \frac{d \zeta_d}{dt} = w_d$$

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

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

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

2.2 난류모델

난류모델은 피스톤의 압축 및 팽창에 수반되는 압축성 효과를 고려한 수정 k-ε 모델을 이용하였다.¹⁷⁾

$$(\rho k)_{,i} + (\rho u_i k)_{,i} = \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,i} \right)_{,i} + G_t - \rho \epsilon$$

$$(\rho \epsilon)_{,i} + (\rho u_i \epsilon)_{,i} = \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \epsilon_{,i} \right)_{,i} + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_t - C_2 \rho \epsilon) + C_3 \rho \epsilon u_{i,i}$$

난류모델 상수는 Table 1과 같다.

2.3 분무-벽 충돌모델

분무액적과 벽면의 충돌모델은 4가지 형태의 모델을 이용하였다. 첫번째는 가장 단순한 경우로 충돌벽면에 액적이 부착되는(stick) 모델이다.²⁾ 이 경우에는 액적이 벽면과의 충돌지점에 흡착된 상태에서 증발되는 것으로 가정하는 모델로써 기존의 대부분의 수치해석 코드에서 분무액적과 벽과의 충돌모델로 이용되어 왔다. 두번째는 벽에 충돌한 액적들이 입사각도와 동일한 각도로

튀겨져 나가는(reflect) 모델이다.²⁾ 이 경우에는 충돌전의 속력은 변치않고 방향만이 변하는 것으로 가정하는 모델이다. 세번째는 충돌후 벽을 따라 경계층 유동을 형성하는 제트(jet) 모델이다.²⁾ 위의 세가지 모델에서는 충돌 액적의 크기는 벽과의 상호작용에 의해서는 변하지 않는 것으로 가정하고 있다. 그러나 실제로 반사되는 상태에서도 액적 자체의 에너지 손실이 발생하며, 액적의 분포 및 분열현상이 달라지게 된다. 이에 따른 연료와 공기의 혼합상태 역시 달라지게 되어 연소에 상당한 영향을 미치게 된다. 마지막으로는 개별 액적 충돌실험에 근거하여 충돌전 운동에너지의 크기에 따라 분무의 거동을 다르게 가정하는 Watkins와 Park의 모델을 이용하였다.¹⁶⁾ 이 모델에서는 충돌전 벽면에 수직인 방향으로의 속도 성분에 의한 웨버수(We)에 따라 충돌후의 분무입자의 거동을 결정하는 방법을 도입하였다. 이 모델에서는 웨버수가 80보다 작은 경우에는 반사모델과 유사하게 처리하는데, 반사모델과 다른점은 충돌후 액적들의 법선방향이나 접선방향 속도성분의 크기가 감소하도록 처리하는 것이다. 웨버수가 80보다 큰 경우에는 충돌후 액적들이 더 작은 액적들로 쪼개지는 것으로 처리하게 되는데, 본 연구에서는 계산용량 및 계산속도 등을 고려하여 2개의 작은 액적들로 쪼개지는 것으로 처리하였다. 위에서 설명한 분무-벽 충돌모델을 도식적으로 나타내면 Fig.1과 같다.

1) 흡착(stick) 모델²⁾ :

$$V_a^n = 0, \quad V_a^t = 0, \quad D_a = D_b$$

2) 반사(reflect) 모델²⁾ :

$$V_a^n = -V_b^n, \quad V_a^t = V_b^t, \quad D_a = D_b$$

3) 제트(jet) 모델²⁾ :

$$V_a^n = 0, \quad V_a^t = V_b^t, \quad D_a = D_b$$

4) Watkins와 Park의 모델¹⁶⁾ :

We < 80인 경우 ;

$$V_a^n = -\alpha V_b^n, \quad V_a^t = \alpha V_b^t, \quad D_a = D_b$$

Table 1 Coefficients of turbulent model

σ_k	σ_ϵ	C_μ	C_1	C_2	C_3
1.0	1.22	0.09	1.44	1.92	-0.373

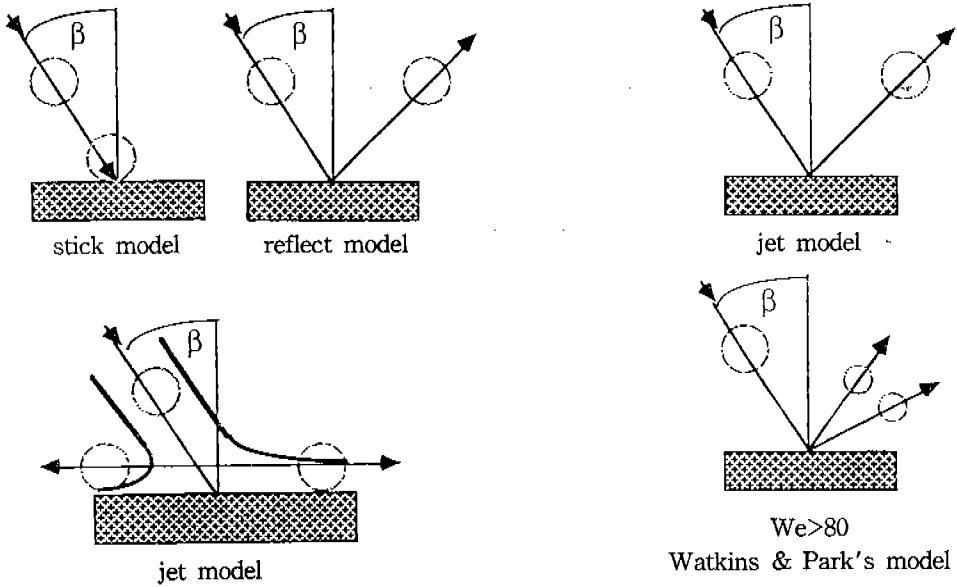


Fig.1 Schematic diagrams of stick, reflect, jet, Watkins and Park's model

$We > 80$ 인 경우 ;

$$(V_a^n)^1 = (V_a^n)^2 = \alpha V_b^n R_{xx}$$

$$(V_a^t)^1 = V_b^t + V_{scat}^t$$

$$(V_a^t)^2 = V_b^t - V_{scat}^t$$

$$D_a = C_w D_b, \quad N_a^1 = N_a^2 = \frac{N_b}{2C_w^3}$$

여기서 $\alpha = \sqrt{1 - x \cos^2 \beta}$, $x = f\left(\frac{We_a}{We_b}\right)^{18}$

$$V_{scat} = V_{film} \cdot R_{xx} \cdot R_{yy}$$

$$V_{film} = 0.835(3.096 - 2\chi)V_b^n$$

$$\chi = 1 \text{ or } 1.28^{16)}$$

$$C_w = f\left(\frac{N_a}{We_b}\right)^{5)}$$

여기서 R_{xx} 는 $[0, 1]$ 의 정규분포를 갖는 임의의 변수(random number)이며, R_{yy} 는 $[0, 2\pi]$ 의 균일한 분포를 갖는 임의의 단위벡터(random unit vector)이다.

3. 수치해석 방법

수치해석 방법으로는 3차원 제어체적을 정의하고 지배방정식을 이 제어체적내에서 체적적분으로 차분화시키는 유한체적법을 이용했다. 기상 지배방정식의 공간차분에는 중심차분법과 상류차분법이 결합된 Hybrid 방법, 시간차분에는 Euler의 음함수 차분법을 적용했다. 라그랑지안 형태의 액상 지배방정식에는 Euler의 음함수차분법을 이용했다. 기상의 반경방향 운동량방정식의 차분형태와 액상의 반경방향 궤적 및 운동량방정식의 차분형태는 다음과 같다.¹⁷⁾

$$\begin{aligned} A_p^n u_{g,p}^n &= \sum A_m^n u_{g,p}^n + A_p^o u_{g,p}^o \\ &- \theta_p^n \alpha \nabla P^n - \frac{1}{\delta t} \sum N_{d,k} (m_{d,k}^n u_{d,k}^n \\ &- m_{d,k}^o u_{d,k}^o) \end{aligned}$$

$$\xi_d^n = \xi_d^o + \delta t \cdot u_d^n$$

$$u_d^n = \frac{u_d^o + \delta t \cdot K_d^n (u^n + u'^n) + \delta t \cdot S_{ud}^n}{1 + \delta t \cdot K_d^n}$$

속도와 압력의 연결문제 처리는 한번의 예측 단계와 두번의 보정단계를 거치는 PISO 알고리즘¹⁹⁾을 이용했다. 차분과정을 통해 얻어진 대수 방정식은 strongly implicit procedure(SIP)²⁰⁾를 이용하여 풀게된다.

본 연구의 초기조건들로는 정적 용기내의 압력, 온도 등이며, 무화과정에 대해서는 분사노즐의 출구에서 이미 무화가 완료되어 임의의 분포를 갖는 액적들이 분사되는 것으로 처리했다. Fig.2에 나타낸바와 같은 노즐출구에서의 기하학적 관계를 고려한 분사 속도벡터는 다음과 같다.¹⁷⁾

$$V_{inj} = (U_{inj} \sin \alpha_z \cos(\alpha_x - \alpha_g), U_{inj} \sin \alpha_x \sin(\alpha_x - \alpha_g), U_{inj} \cos \alpha_z)$$

여기서 α 는 좌표축과 분사방향의 기하학적 형상각을 나타내며, 무화된 액적들의 분사속력은 오리피스 유동방정식을 응용하여 다음과 같이 처리했는데, 본 저자의 기존의 연구결과들에서와 동일하다.^{21~24)}

$$U_{inj} = C_0 \left(\frac{2\Delta P}{\rho d} \right)^{1/2}$$

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 90년대 이전의 수치적연구에서

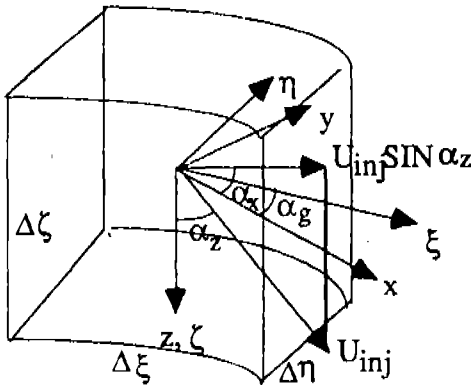


Fig.2 Injection cell

주로 이용되었던 3가지 분무와 벽 충돌모델²⁾과 최근에 들어서 분무와 벽면의 충돌현상에 대한 해석모델로 많은 연구가 진행중인, 충돌전 벽면에 수직인 방향으로의 속도 성분에 의한 웨버수에 따라 충돌후의 분무입자의 거동을 결정하는 모델¹⁶⁾의 적용성 및 타당성을 검증하기 위하여 정적 분위기의 용기내에서의 분무의 충돌거동을 정성적으로 해석하였다.

계산조건은 Table 2에 나타낸 바와 같이 Fujimoto 등²⁵⁾의 실험조건과 동일하다. 본 연구에서는 충돌각도, 상온의 분위기 압력 그리고 분사되는 액적들의 크기를 변수로 평판상에 충돌하는 분무의 거동에 대해 수치계산하였다. 분무연료는 n-dodecane(C₁₂H₂₆)의 물성치들을 이용하여 모델링한 디젤유이다. 분사노즐의 직경은 0.2mm이며, 분사기간은 1.0ms이다. 한편 분사되는 디젤연료의 온도와 정적 용기내의 온도를 300K로 같게 처리했기 때문에 증발현상은 고려되지 않았다. 정적 용기는 가로×세로×높이가 110[mm]×110[mm]

Table 2 Calculation parameters

Nozzle number	1
Nozzle diameter[mm]	0.2
Injection pressure[MPa]	13.8
Injection duration[ms]	1.0
Injection fuel Temperature[K]	300
Ambient air pressure[MPa]	0.5, 1.0, 1.5
Ambient air temperature[K]	300
Impingement distance[mm]	24
Inclination angle[deg]	15, 45
Initial SMD[μ m]	23, 82

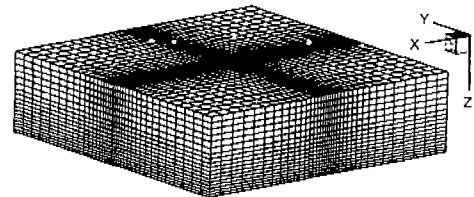


Fig.3 Computational grid of 39×39×20

×30[mm]의 사양이며, 격자계는 Fig.3에 나타낸 바와 같이 39×39×20로 구성하였다. 계산격자의 구조는 계산결과와 정확도에 영향을 미치는 중요한 요인중의 하나인데, 일반적으로는 격자수가 많아질수록 보다 정확한 결과를 얻을 수 있으나 컴퓨터의 기억용량과 계산시간 등의 제약조건으로 허용할 수 있는 격자수에는 한계가 있다. 특히 분무계산에서는 보이드율 등과 같은 변수로 인해 수렴성에 문제가 발생하고 계산이 불가능한 경우도 발생하므로 주의를 필요로 한다.

Fig.4는 Watkins와 Park의 모델을 이용하여, 정적 용기내의 압력이 1.0MPa, 충돌각도가 45deg 그리고 분사액적의 초기 SMD가 82 μ m일 때 분무 경과시간에 따른 분무중심의 x-z평면에서의 속도장을 나타낸다. 분무의 중심축상의 평면에서의 기상의 속도장은 충돌지점으로부터 바깥쪽으로 커지는 벽-제트를 보여주고 있다. 분무 선단의 가장자리 부근에 생성된 와류의 중심은 분무시간의 경과에 따라 충돌벽쪽으로 이동하다가 충돌벽부근에서는 충돌지점의 하류쪽으로 밀려나는 것을 볼 수 있다. 이러한 벽 주위의 와류로 인한 정체 유동장의 영향으로 벽에 접근하는 작은 액적들은 상대적으로 작은 운동량을 갖고 있기 때문에 벽에 충돌하지 못하고 반사되는 것으로 생각된다. 반면에 상대적으로 운동량이 큰 액적들은 벽에 충돌한후 벽면을 따라서 유동하다가 선단의 와류에 의해 벽면의 법선방향으로 밀려올라 가면서 하류쪽으로 유동하는 것으로 사료된다.

Fig.5과 Fig.6는 분무와 벽 충돌모델에 따른 액적분포를 도시한 결과로써, 정적 용기내의 압력이 1.0MPa, 충돌각도가 45deg 그리고 분사액적의 초기 SMD가 82 μ m일 때 분무 경과시간에 대한 분무중심의 x-z평면에서와 모든 액적들을 x-y평면에 투영시킨 경우의 액적분포를 나타낸다. 흡착모델을 이용하는 경우 벽면에 충돌한 액적들은 충돌지점에 부착되는 것으로 처리하기 때문에 하류쪽에서의 도달거리가 가장 짧게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 충돌후의 x-y평면에서의 액적분포는 거의 반원에 가까운 형상을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 이 경우

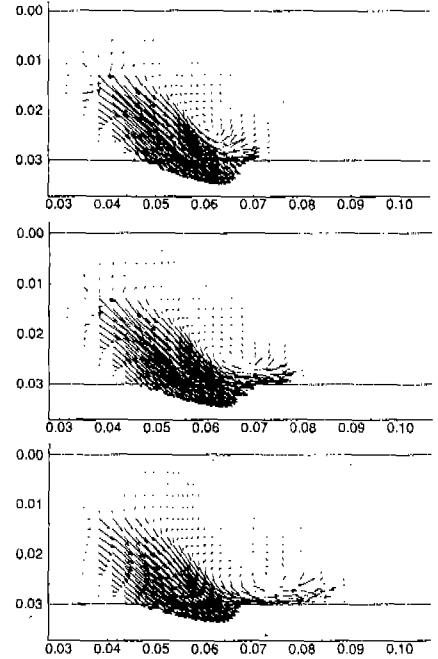
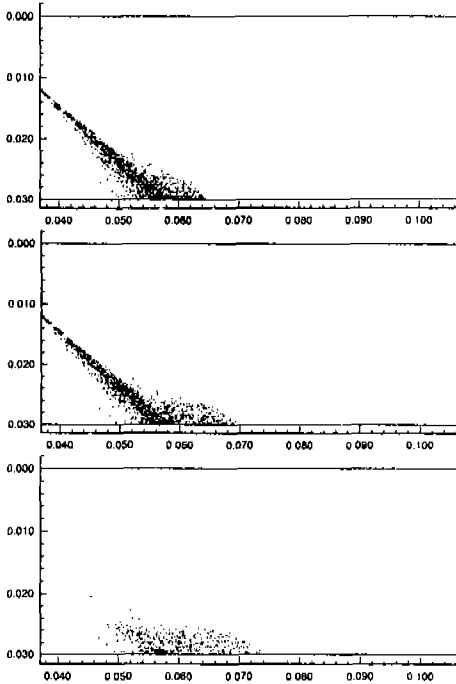
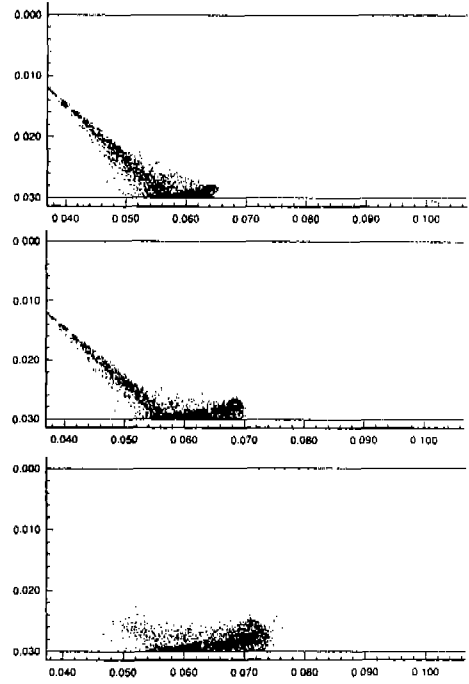


Fig.4 Gas velocity vectors showing wall-jet head vortex structure at 0.8, 1.0, 1.2ms after the start of injection in a x-z plane

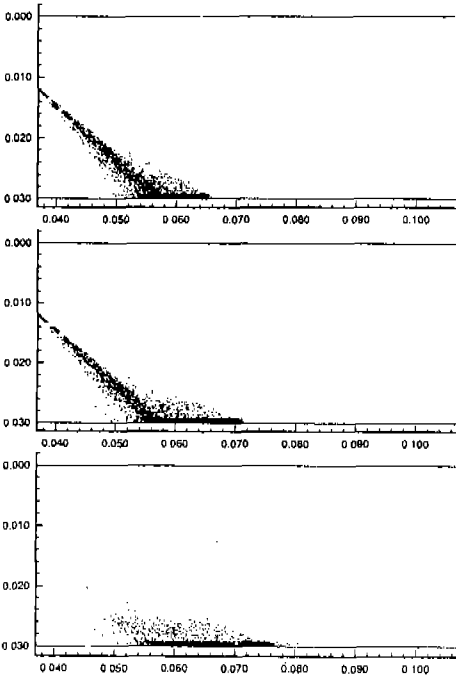
에도 운동량이 작은 액적들은 기상에 의해서 형성된 유동장의 영향으로 벽면에 충돌하지 못하고 반사되기 때문에 벽면에 부착되지 않는 액적들이 있는 것을 알 수 있다. 반사모델에서는 벽면에 충돌한 액적들은 모두 방향만이 변한채 입사각도와 같은 각도로 반사되는 것으로 처리하지만 운동량이 작아서 충돌하지 못하고 방향을 선회하는 액적들이 충돌초기에 상당히 있는 것을 충돌지점의 벽면 윗쪽에서 볼 수 있다. 이 경우에는 벽면에 충돌한 액적들은 모두 방향만이 변한채 입사각도와 같은 각도로 반사되는 것으로 처리하기 때문에 충돌후의 분무선단에서의 벽면 윗쪽에서의 높이가 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 충돌후의 x-y평면에서의 액적분포는 흡착모델보다는 타원도가 증가한 것을 알 수 있다. 제트모델에서는 벽면에 충돌한 액적들은 모두 접선방향의 속도성분만을 갖는 것으로 처리하기 때문에 거의 모든 액적들이 분무시간의 경과에 상관없이 벽면부근에 분포되는 것을



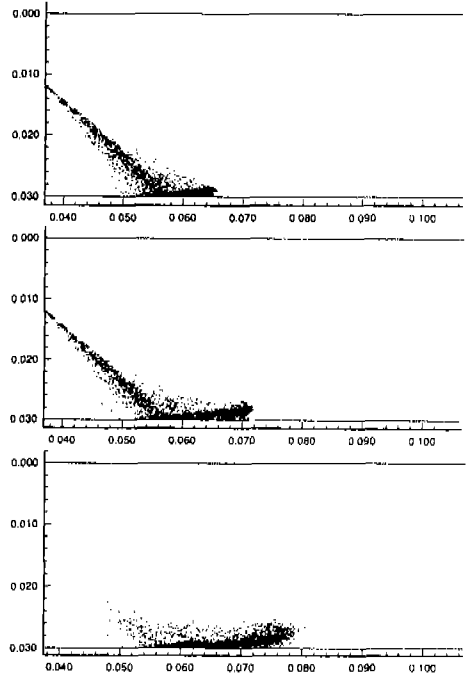
stick model



reflect model



jet model



Watkins & Park's model

Fig.5 Comparison of distribution of droplets with impingement models at 0.8, 1.0, 1.2ms after the start of injection in a x-z plane ($P_a=1.0\text{MPa}$, $\beta=45\text{deg}$, $SMD_{in}=82\ \mu\text{m}$)

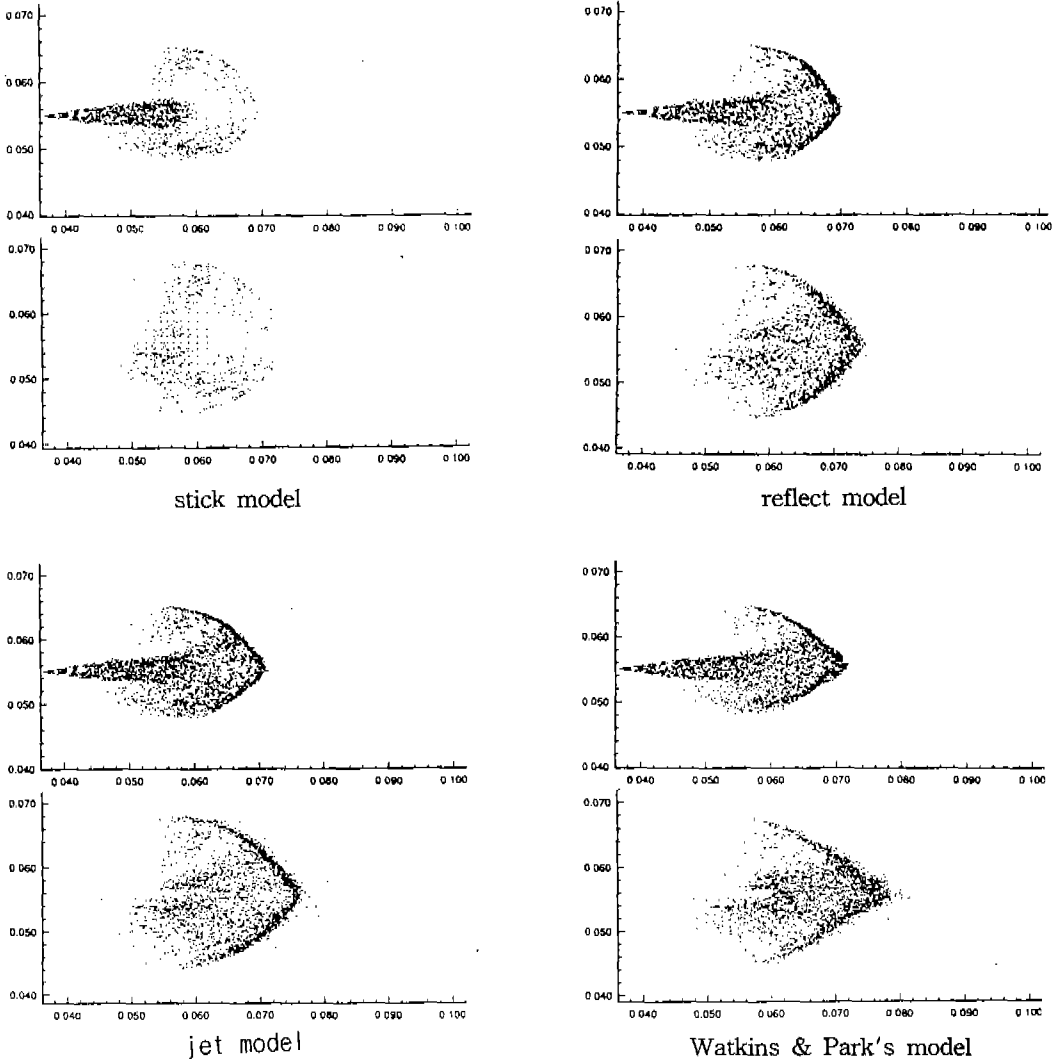


Fig.6 Comparison of distribution of droplets with impingement models at 1.0, 1.2ms after the start of injection in a x-y plane ($P_a=1.0\text{MPa}$, $\beta=45\text{deg}$, $SMD_{in}=82\ \mu\text{m}$)

알 수 있다. 이경우에도 운동량이 작은 액적들은 기상에 의해서 형성된 유동장의 영향으로 벽면에 충돌하지 못하고 반사되기 때문에 벽면에 부착되지 않는 액적들이 있는 것을 알 수 있다. 충돌후의 x-y평면에서의 액적분포는 흡착모델보다는 타원도가 증가하지만 반사모델과는 거의 유사한 타원도를 나타낸다. Watkins와 Park의 모델을 이용한 경우 충돌후의 분무선단의 도달거리가 가장 크며, 선단에서 와류에 의해 벽면의

법선방향으로 밀려올라 가는 액적분포가 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 비록 분무선단에서의 벽면 윗쪽으로의 높이가 반사모델의 경우보다는 낮지만 액적 분포의 경향은 보다 타당성을 갖는 것으로 생각된다. 충돌후의 x-y평면에서의 액적분포는 타원도가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig.7와 Fig.8은 충돌각도가 45deg, 분사액적의 초기 SMD가 82 μm , 분무 경과시간이 1.0ms

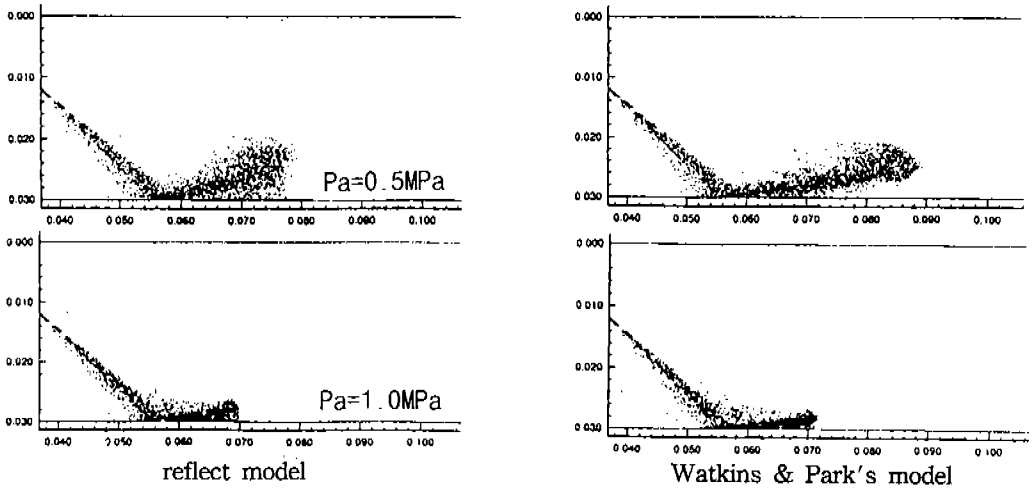


Fig.7 Comparison of distribution of droplets with ambient pressures(Pa) at 1.0ms after the start of injection in the x-z plane ($\beta=45\text{deg}$, $\text{SMD}_i=82\ \mu\text{m}$)

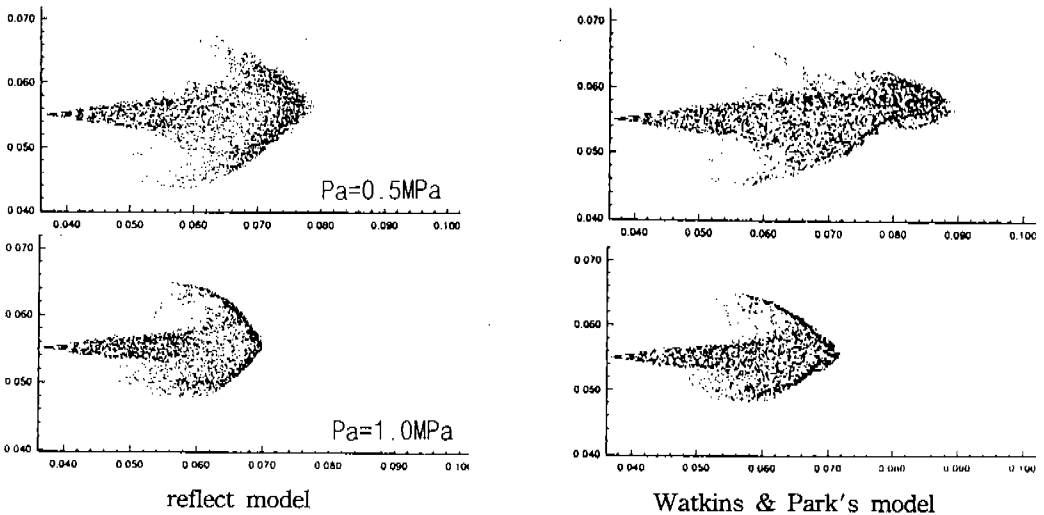


Fig.8 Comparison of distribution of droplets with ambient pressures(Pa) at 1.0ms after the start of injection in the x-y plane ($\beta=45\text{deg}$, $\text{SMD}_i=82\ \mu\text{m}$)

일 때 정적 용기내의 압력(밀도)변화에 따른 액적 분포를 나타낸다. 벽면 충돌후의 분무의 도달거리, 폭 및 높이는 주위 압력(밀도)이 커질수록 감소하는 것을 알 수 있다. 용기내 공기의 밀도가 증가할수록 액적의 유동에 대한 저항이 증가하기 때문에 충돌지점에서 외곽쪽으로 분무의 발달정

도는 작아진다. 이는 자유분무에서 분무의 도달거리가 분위기 밀도가 증가할수록 작아지는 경향과 유사한 특성이다. 일반적으로 충돌후의 액적들은 벽면의 높이 방향으로 보다는 벽면의 접선방향으로 더 멀리 확산되는 것을 알 수 있다.

Fig.9과 Fig.10은 충돌후의 하류방향에서의 분

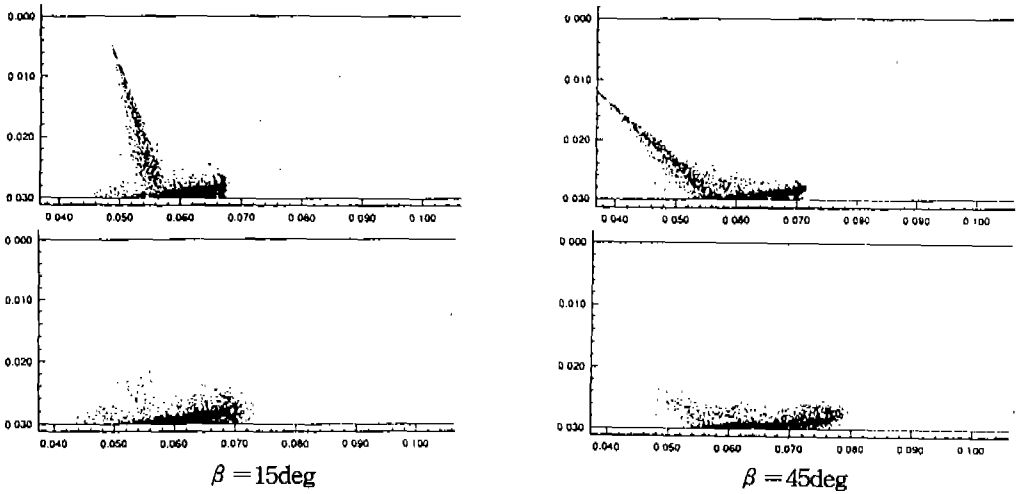


Fig.9 Comparison of distribution of droplets with inclination angles(β) at 1.0, 1.2ms after the start of injection in the x-z plane ($P_a=1.0\text{MPa}$, $SMD_m=82\ \mu\text{m}$)

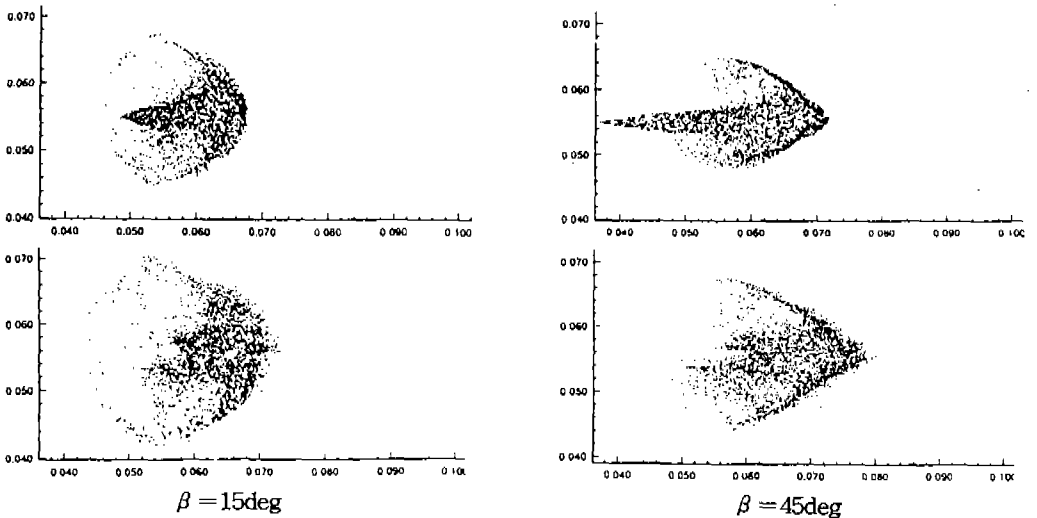


Fig.10 Comparison of distribution of droplets with inclination angles(β) at 1.0, 1.2ms after the start of injection in the x-y plane ($P_a=1.0\text{MPa}$, $SMD_m=82\ \mu\text{m}$)

무의 도달거리와 높이에 대한 충돌각의 영향을 나타낸 결과로써, 정적 용기내의 압력이 1.0MPa, 분사액적의 초기 SMD가 82 μm 일 때 Watkins와 Park의 모델을 이용한 경우의 분무 경과시간에 따른 액적분포를 나타낸다. 충돌각도가 증가함에 따라서 벽면에 충돌한후의 액적들은 주로 하

류쪽으로 발달하고 상류쪽으로는 거의 발달하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 충돌각도가 커질수록 도달거리는 증가하며, 선단의 높이는 작아지는 것을 알 수 있다. 충돌후의 액적의 분포는 충돌각도가 작을수록 거의 원형의 분포를 나타내지만 충돌각도의 증가에 따라 액적들은 타원형의 분

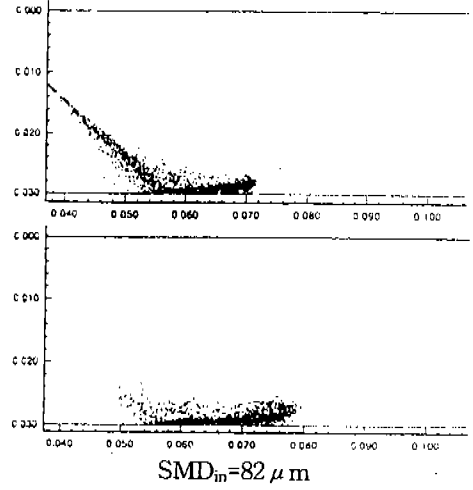
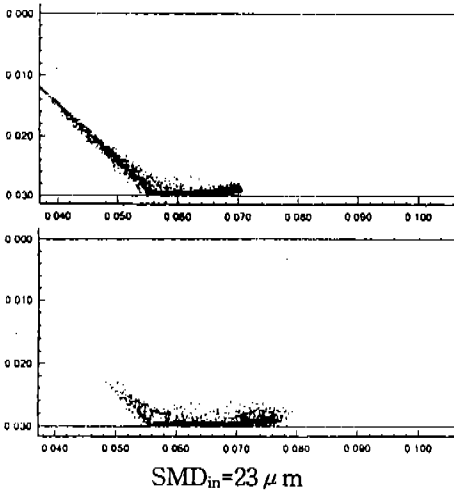


Fig.11 Comparison of distribution of droplets with initial SMD(SMD_{in}) at 1.0, 1.2ms after the start of injection in the x-z plane ($P_a=1.0MPa$, $\beta=45deg$)

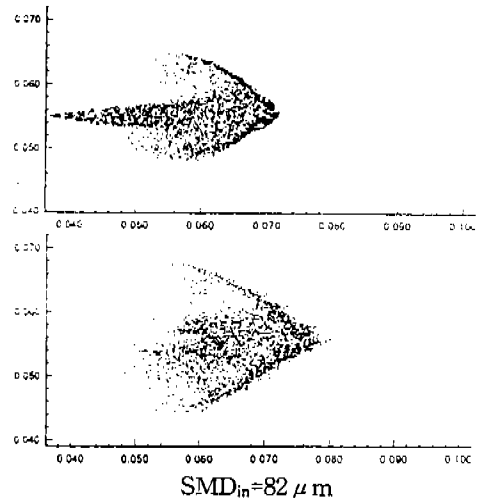
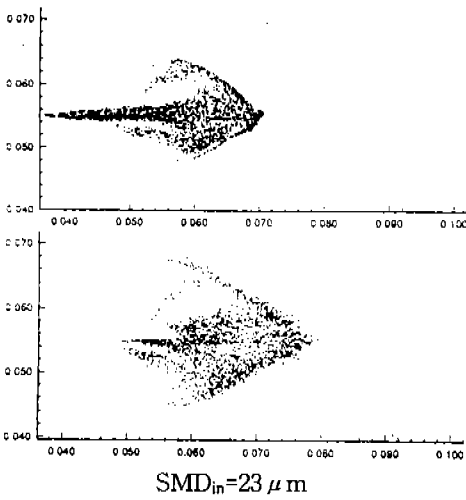


Fig.12 Comparison of distribution of droplets with initial SMD(SMD_{in}) at 1.0, 1.2ms after the start of injection in the x-y plane ($P_a=1.0MPa$, $\beta=45deg$)

포를 나타내는 것을 알 수 있다. 타원형의 형상은 충돌각이 커질수록 타원도가 증가하게 된다.

Fig.11와 Fig.12은 분사액적의 초기 SMD의 변화에 대한 액적분포를 도시한 결과로써, 정적 용기내의 압력이 1.0MPa, 충돌각도가 45deg일 때 Watkins와 Park의 모델을 이용한 경우의

분무 경과시간에 따른 액적분포를 나타낸다. 상대적으로 운동량이 작은 크기가 작은 분사 액적들에 의해서 형성되는 유동장의 와류는 강도가 약하고 하류쪽으로의 진행속도가 느리기 때문에 충돌후 선단의 도달거리가 짧게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 크기가 작은 액적들에 의해 형

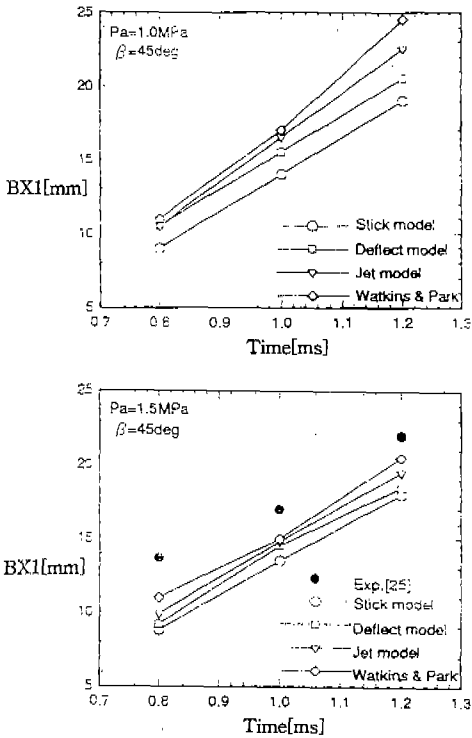


Fig.13 Comparison for penetration radius in downstream of impinging spray

성된 유동장은 난동성분의 강도가 큰 액적들의 경우보다 상대적으로 약하기 때문에 액적들의 확산도가 작은 것으로 사료된다.

Fig.13은 정적 용기내의 압력이 1.0, 1.5MPa일 때 충돌각도가 45deg의 경사충돌인 경우의 분무 후 경과시간에 따른 충돌후의 하류쪽 도달거리 (BX1)를 나타낸다. 정적 용기내의 압력이 1.5MPa일 때 Watkins와 Park의 모델을 이용한 경우의 충돌후의 분무선단의 도달거리가 실험치에 가장 근접한 것을 알 수 있다. 전체적으로 정성적인 경향뿐만 아니라 정량적으로도 수치계산시의 노즐출구에서의 초기조건 등의 오차요인을 고려하면 상당히 실험결과에 근접하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

분무와 벽 충돌모델의 적용성 및 타당성을 검증하기 위하여 정적 분무기의 용기내에서의 분

무의 충돌거동을 정성적으로 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

크기가 작은 액적들과는 달리 상대적으로 큰 액적들은 벽에 충돌한후 벽면을 따라서 유동하다가 선단의 와류에 의해 벽면의 법선방향으로 밀려올라 가면서 하류쪽으로 유동하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구의 결과에서는 Watkins와 Park의 모델을 이용했을 때가 이러한 경향과 가장 유사한 액적분포를 얻을 수 있었으며, 충돌후의 분무선단의 도달거리 또한 실험치에 가장 근접한 것을 알 수 있었다.

벽면 충돌후의 분무의 도달거리, 폭 및 높이는 주위 압력(밀도)이 커질수록 감소하며, 충돌후의 액적들은 벽면의 높이 방향으로 보다는 벽면의 접선방향으로 더 멀리 확산되는 것을 알 수 있다.

충돌각도가 증가함에 따라서 벽면에 충돌한후의 액적들은 주로 하류쪽으로 발달하고 상류쪽으로는 거의 발달하지 못하며, 충돌후의 액적의 분포는 충돌각도가 작을수록 거의 원형의 분포를 나타내지만 충돌각의 증가에 따라 액적들은 타원형의 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

모델의 물리적 배경 및 계산결과와 정성적 정확성을 고려해 볼 때 분무와 벽면 충돌에 따른 상호작용의 영향을 해석하기 위한 연구에 Watkins와 Park의 모델을 이용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 따라서 본 저자는 추후의 연구에서 이 모델의 정량적 타당성을 고찰할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 포항공과대학 AFERC(9711-33)의 연구비 일부지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y. Matsui and K. Sugihara, "Sources of Hydrocarbon Emissions from a small Direct Injection Diesel Engine", JSAE

- Review, 7, pp. 4~11, 1986.
2. J. D. Naber and R. D. Reitz, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE 880107, 1988.
 3. N. Katsura, M. Saito, J. Senda and H. Fujimoto, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall", SAE 890264, 1989.
 4. H. Fujimoto, M. Saitou, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Surface", XIX International Symposium on Heat and Mass Transfer in Gasoline and Diesel Engines, 1987.
 5. J. D. Naber and P. V. Farrell, "Hydrodynamics of Droplet Impingement on a Heated Surface", SAE Paper 930919, 1993.
 6. C. Arcoumomis and J. C. Chang, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Transient Diesel Sprays.", SAE 940678, 1994.
 7. A. A. Amsden, J. D. Ramshaw, P. J. O'Rourke and J. K. Dukowicz, "KIVA A : A Computer Program for Two- and Three- Dimensional Fluid Flows with Chemical Reactions and Fuel Sprays", Report No. LA-10245-MS, 1985.
 8. A. A. Amsden, P. J. O'Rourke and T. D. Butler, "KIVA-II : A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Spray", Technical Report LA-11560 -MS, Los Alamos National Laboratory Report, May, 1987.
 9. H. L. Nguyen, H. J. Schock, M. H. Carpenter, J. I. Ramos and J. D. Stegeman, "Numerical Simulation of the Flow Field and Fuel Sprays in an IC Engine", SAE 870599, 1987.
 10. M. H. Carpenter and J. I. Ramos, "Mathematical Modeling of Uniflow-scavenged Two-Stroke Diesel Engines", in *Modelado en Motores de Combustion Interna*, eds. F. Payri, J.M. Desantes, and F. Boada, pp. 321~332, Spain, 1987.
 11. A. Idoum, F. J. Wallace, J. P. Packer and S. J. Charlton, "An Experimental and Analytical Study of Jet Impingement and Wall Jets in High Swirl D.I. Diesel Engines Using the Hydraulic Analogy", SAE 850263, 1985.
 12. C. Bai and A. D. Gosman, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation", SAE 950283, 1995.
 13. A. P. Watkins and D. M. Wang, "A New Model for Diesel Spray Impaction on Walls and Comparison with Experiment", Pro. COMODIA 90 Int. Symposium on Diagnostics and Modelling of Combustion in I.C. Engines, Kyoto, Japan, pp. 243~248, 1990.
 14. D. M. Wang, "Modelling Spray Wall Impaction and Combustion Processes of Diesel Engines", Ph.D. Thesis, University of Manchester, 1992.
 15. D. M. Wang and A. P. Watkins, "Numerical Modelling of Diesel Wall Spray Phenomena", Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 14, pp. 301~312, 1993.
 16. A. P. Watkins and K. Park, "Assessment and Application of a New Spray Wall Impaction Model", IMechE C499/004/96, 1996.
 17. A. P. Watkins, "Three-Dimensional Modelling of Gas Flow and Sprays in Diesel Engines", ed. Markatos, N. C., *Computer Simulation for Fluid Flow, Heat and Mass Transfer, and Combustion in Reciprocating Engines*, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 193~237, 1989.
 18. L. J. H. Wachters and N. A. J. Wes-

- terling, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in a Spheroidal State", Chem. Eng. Sci., Vol. 21, pp. 1047~1056, 1966.
19. R. I. Issa, "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator Splitting", J. Comp. Phys., Vol. 62, pp. 40~65, 1985.
 20. L. H. Stone, "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations", SIAM J. Numerical Analysis, Vol. 5, No. 3, pp. 530~559, 1968.
 21. H. C. Yang, H. S. Ryou, K. B. Hong, H. S. Kim and S. K. Park, "The Application of RNG $k-\epsilon$ Model to the Analysis of Flows and Spray Characteristics", Atomization and Sprays, Vol. 7, No. 6, 1997.
 22. 양희천, 유홍선, "유동장 및 분무특성에 미치는 난류모델의 영향", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제1호, pp. 87~100, 1997.
 23. H. C. Yang, H. S. Ryou, Y. T. Jeong and Y. K. Choi, "Characteristics in a Direct Injection Diesel Engine", Atomization and Sprays, Vol. 6, No. 1, pp. 95~109, 1996.
 24. 양희천, 최영기, 유홍선, "디젤기관 연료분무의 분산현상에 대한 수치해석적 연구", 한국자동차공학회논문집, 제3권, 제6호, pp. 8~22, 1995.
 25. H. Fujimoto, J. Senda, M. Nagae and A. Hashimoto, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall", Int. Symposium COMODIA 90, pp. 193~198, 1990.