

직접분사식 엔진내의 분무/벽 충돌 현상에서 텀블 효과에 관한 연구

A Numerical Study of Tumble Effect on Spray/Wall Impingement in the D. I. Engines

채 수*, 양 협**, 유수열***, 유홍선****
Soo Chae, Hyup Yang, Suyeal Ryou, Hongsun Ryou

ABSTRACT

In this paper, the results gained by applying many impingement models to the cylinder and flat plate were analyzed in comparison with the experimental data to study a spray/wall interaction phenomena. To begin with, the behavior of spray injected normal to the wall was analysed using three different impingement models ; Naber and Reitz model(NR model), Watkins and Wang model(WW model) and Park and Watkins model(PW model) in the present calculation. The results obtained from these models were compared with experimental data of Katsura et. al. The results indicated that PW model was in better agreement with experimental data than the NR and WW model. Also for spray injected at 30DEG , the result of three models were compared with experimental data of Fujimoto et. al. The results showed that NR model overpredicted the penetration in the radial direction because this model was based on the inviscid jet analogy. WW model did not predicted the radius and height of the wall spray effectively. It might be thought that this discrepancy was due to the lack of consideration of spray film velocity occurred at impingement site. The result of PW model agrees with the experimental data as time goes on. In particular, a height of the spray droplets was predicted more closely to the experimental data than the other two models. The results of PW model in which the spray droplets were distributed densely around the edge of droplet distribution shaped in a circle had an agreement with the experimental data of Fujimoto et. al. Therefore, it was concluded that PW model performed better than NR and WW model for prediction of spray behavior. The numerical calculation using PW model performed to the cylinder similar to the real shape of DI engine. The results showed that vortex strength near the wall in the cylinder was stronger than that in the case of flat plate. Contrary to the flat plate, an existence of the side wall in the cylinder caused the tangential velocity component to be reduced and the normal velocity component to be increased. The flow tends to rotate to the inside of cylinder going upward to the right side wall of cylinder gradually as time passes. Also, the results showed that as the spray angle increases, the gas velocity distribution and the tumble flow seemed to be formed widely.

주요기술용어 : Spray impingement(분무충돌), Penetration(분무침투), Inviscid jet(비 점성 제트), Naber and Reitz model(NR model), Watkins and Wang model(WW model), Park and Watkins model(PW model), Vortex(보텍스)

* 회원, 군장대학 자동차기계학부
** 회원, 삼척대학교 자동차공학부
*** 회원, 중앙대학교 기계공학부

Nomenclature

- G_t : 난류 운동 에너지의 생성항
- K_d : 운동량 전달계수
- S_ϕ : 기상 지배 방정식의 생성항
- S_{ud}, S_{vd}, S_{wd} : 액상 지배 방정식의 생성항
- S_ϕ^d : 기상과 액상의 상호 작용에 의한 생성항
- u, v, w : 직교 곡선 좌표계에서 기상의 각 방향속도 성분(m/s)
- u_d, v_d, w_d : 직교 곡선 좌표계에서 액적의 의한 생성항
- u', v', w' : 직교 곡선 좌표계에서 기상의 각 방향 변동 속도 성분(m/s)
- μ_{eff} : 유효 점성 계수(kg/ms)
- θ : 보이드 율
- Γ_ϕ : 지배 방정식의 확산 계수
- $\Delta V (= \Delta \xi \Delta \eta \Delta \zeta)$: 국부적인 체적변화
- ρ : 기상의 밀도
- θ : 보이드 율
- Γ_ϕ : 확산계수
- $S_{mb}^d, S_{xp}^d, S_e^d$: 기상과 액상의 상호 작용에 관련된 생성항
- C_d : 항력 계수
- ρ_d : 액상의 밀도
- D_d : 액적의 직경,
- u', v', w' : 기상의 난류 섭동 성분
- u, v, w : 기상의 평균 속도 성분

1. 서 론

직접 분사식 디젤 엔진 내에서 발생하는 분무의 충돌현상을 보다 현실적으로 구현하기 위한 실험이 꾸준히 진행되어 왔다. 이러한 액적충돌에 대한 실험적인 접근은 실제로 유용한 정보를 얻는데에 많은 어려움이 존재한다. 따라서 대부분의 충돌현상에 대한 규명 및 관련 파라미터의 상호관계를 도출하는데 단일액적 실험이 근

간이 되어왔다. 이와 같은 실험은 대부분이 사진 기술, PDA 및 PDPA를 이용하고는 있으나 엔진 내의 액적들의 거동에 관한 구체적인 데이터를 확보하는 것이 매우 어려운 실정이다.

최근에 들어 컴퓨터의 비약적인 발전은 다차원 분무현상 및 충돌현상에 관한 수치 해석적인 연구를 가능하게 해왔다.

Naber와 Reitz 등¹⁾은 Wachters와 Westerling²⁾에 관한 실험에 기초한 모델을 제안하였다. 이 모델은 We No.가 40 이상이면 반사되지 않고 비 점성 제트와 유사하게 벽면을 따라 진행된다고 가정하였다. Watkins와 Wang 등³⁾은 Naber와 Reitz의 모델과는 달리 액적의 충돌 후에 액적의 운동 에너지의 감소를 고려한 모델을 제시하였다. 그들은 충돌전의 액적의 We No.가 충돌후의 액적거동을 결정한다고 생각하였으며 Wachters와 Westerling²⁾의 데이터를 이용하여 운동 에너지의 감소율을 결정하였다. 이 모델은 Naber와 Reitz 모델의 문제점을 보완하여 보다 효과적인 액적의 퍼짐(drop spread)을 예측한 반면 부서짐(scattering)영역에서는 충돌 후에 액적의 수직속도성분을 하향 예측하는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 이와 같이 실험적으로 매우 어려운 엔진내의 분무, 분무/벽 충돌 현상을 연구하였다. 엔진 모델은 직접 분사식 내연기관이며 이를 위해 먼저 정적인 상태에서 평판에 분무를 충돌시켜 충돌 후에 발생하는 텀블유통의 생성 및 액적과의 상호작용을 정적상태에서 수치해석을 수행함으로써 유동장의 형태에 대한 정성적인 특성을 이해하고 텀블에 의한 액적들의 거동을 예측하였다.

계산에 사용한 코드는 EPISO-spray⁴⁾이며 분무 모델은 TAB 모델⁵⁾을 사용하였다. 분무/벽 충돌 모델은 최근에 개발된 Park & Watkins 모델,⁶⁾ Watkins & Wang 모델,⁷⁾ Naber & Reitz 모델⁸⁾들을 도입하였으며 분무는 저온벽면에 수직(0°) 혹은 경사각(30°)을 주어 분사하였다. 결과는 타당성 및 정확성을 확인하기 위해서 Katsura⁹⁾와 Fujimoto 등¹⁰⁾의 실험결과와 상호 비교하였다.

평판에서의 벽/충돌해석이 끝난 후에는 이들 중 가장 실험치에 근접하다고 판단되는 Park 모델⁶⁾을 정적인 조건을 갖춘 직접 분사식 디젤 엔진에 적용하여 분무/벽면 충돌 시에 발생하는 액적들의 거동과 액적과 텀블유동간의 상호작용에 대한 물리적인 이해를 살펴보았다. 여기서 말하는 텀블유동은 흡기가 흡기다기관을 통해서 유입될 때 발생하는 유동형태가 아니라 실린더 내로 분무가 분사될 때 분무의 속도에 의해서 실린더내에서 발생하는 회전유동을 말한다.

또한, 분사각 등과 같은 파라미터를 변화시킴으로써 텀블유동의 보텍스(vortex) 강도의 변화 및 그에 따른 액적거동특성의 변화를 분석하였다.

2. 이론 및 수치해석

2.1 지배 방정식

2.1.1 기상에 대한 지배 방정식

직교 곡선 좌표계를 이용하여 일반적인 종속 변수 ϕ 에 대한 지배 방정식의 형태를 나타내면 다음과 같다.

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

2.1.2 액상에 대한 지배 방정식

액상은 Dukowicz¹¹⁾의 통계학적인 방법을 적용하여 불연속 액적 모델을 이용하여 처리하였다. 액적들의 궤적과 운동량에 대한 방정식은 직교 곡선 좌표계의 각 방향(ξ, η, ζ)에서의 액적위치(ξ_d, η_d, ζ_d)와 속도 성분(u_d, v_d, w_d)에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d\xi_d}{dt} = u_d, \quad \frac{d\eta_d}{dt} = v_d, \quad \frac{d\zeta_d}{dt} = w_d, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_d}{dt} &= K_d(u + u' - u_d) + S_{ud} \\ \frac{dv_d}{dt} &= K_d(v + v' - v_d) + S_{vd} \\ \frac{dw_d}{dt} &= K_d(w + w' - w_d) + S_{wd} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$K_d = \left(\frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_d} \frac{1}{D_d} V_{rel} \right) : \text{운동량 전달계수}$$

$$V_{rel} = \left\{ (u + u' - u_d)^2 + (v + v' - v_d)^2 + (w + w' - w_d)^2 \right\}^{1/2} : \text{2상 사이의 상대 속도}$$

2.1.3 κ - ϵ 난류 방정식

본 연구에서 이용된 난류 모델은 레이놀즈가 제시한 형태로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta V} \frac{\partial}{\partial t} (\theta \rho \Delta V k) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\theta \rho w k) \\ & + \frac{1}{\Delta \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (\theta \rho \Delta \eta u k) + \frac{1}{\Delta \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta \rho \Delta \xi v k) \\ & = \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\theta \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \zeta} \right) + \frac{1}{\Delta \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\theta \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \Delta \eta \frac{\partial k}{\partial \xi} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\theta \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \Delta \xi \frac{\partial k}{\partial \eta} \right) \\ & + G_t - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} (\rho k + \mu_{eff} \nabla \cdot \bar{u}) - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta V} \frac{\partial}{\partial t} (\theta \rho \Delta V \epsilon) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\theta \rho w \epsilon) \\ & + \frac{1}{\Delta \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (\theta \rho \Delta \eta u \epsilon) + \frac{1}{\Delta \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} (\theta \rho \Delta \xi v \epsilon) \\ & = \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\theta \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial \zeta} \right) + \frac{1}{\Delta \eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\theta \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon}} \Delta \eta \frac{\partial \epsilon}{\partial \xi} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta \xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\theta \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\epsilon}} \Delta \xi \frac{\partial \epsilon}{\partial \eta} \right) \frac{\epsilon}{k} \left[C_1 \left(G_t - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} (\rho k + \mu_{eff} \nabla \cdot \bar{u}) \right) - C_2 \rho \epsilon \right] + C_3 \rho \epsilon \nabla \cdot \bar{u} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } \mu_{eff} \left(= \mu + \frac{C_{\mu} \rho k^2}{\epsilon} \right)$$

: 유효 점성 계수

또한 난류 모델 상수들은 Table 1과 같다.

Table 1 Coefficients of κ - ϵ turbulence 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

2.2 분무 모델

2.2.1 Reitz와 Diwaker의 분산모델

Reitz와 Diwaker¹²⁾는 Weber의 연구범위에 포함되는 임계 We No.(=12)를 기준으로 bag 분산과 stripping 분산을 선택적으로 적용할 수 있는 분산 모델을 개발하였는데 본 연구에서도 이들의 모델을 사용하여 액적들의 분산을 처리하였다.

2.2.2 액적간의 충돌 및 융합 모델

액적간의 상호작용의 영향을 고려하기 위하여 O'Rourke¹³⁾의 충돌 및 융합 모델을 이용하였다. parcel들이 체적이 V 인 동일한 격자내에 위치할 때만 충돌이 발생하는 것으로 처리한다.

2.2.3 분무/벽 충돌 모델

본 연구에서 사용한 충돌모델들은 최근에 개발된 Naber & Reitz 모델, Watkins and Wang 모델 그리고 Park & Watkins 모델이며 분사되는 분무 방향은 저온벽면에 수직상태로 고려하였다.

2.3 수치해석 방법

본 논문에서는 직교 격자로 구성된 3차원 제어체적을 정의하고 각 보존 방정식을 이 제어체적내에서 체적 적분으로 차별화시키는 유한 체적법, 시간 영역에 대한 차별화는 오일러(Euler) 음함수 방법 그리고 공간영역에 대해서는 하이브리드(hybrid) 방법을 이용하였다.

2.4 계산의 초기조건과 경계조건

벽면의 경계조건은 점착(no-slip) 경계조건을 사용하여 운동량 방정식에서 대류항을 소거시켰으며 확산항은 첫 번째 격자점에서 ξ 방향만을 고려하였고 벽 마찰 응력 τ_w 를 사용하였다.¹⁴⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 분무를 수직(0°)으로 충돌시킨 경우

Fig. 1과 Fig. 2는 측면 벽이 개방되어 있는 평

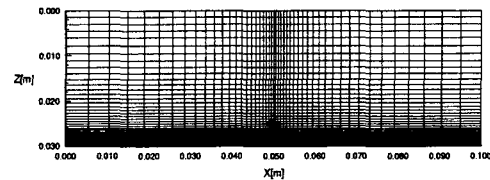
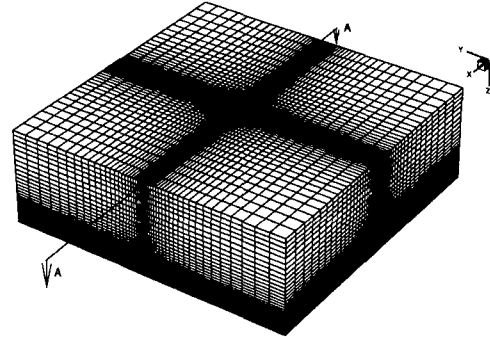


Fig. 1 Computational domain for normal impinging spray

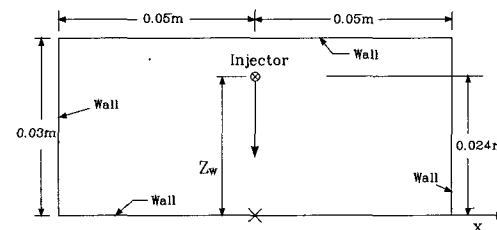
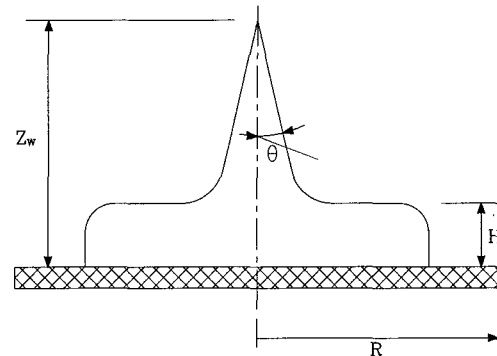


Fig. 2 Schematic diagrams for normal impinging spray

판에 분무 액적들을 0°로 수직하게 충돌시킬 때 사용된 격자 시스템과 도면을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 격자계의 형태는 3차원 직육면체로서 x 방향과 y 방향으로 각각 0.1m, 0.1m이며 z 는 0.03m이며, 격자수는 $x \times y \times z$ 에

대하여 $50 \times 50 \times 50$ 개이다. 격자계에서 충돌 분무의 영향이 매우 지배적인 충돌 벽면 근처 영역에 대한 격자는 조밀하게 구성하였으며 연료를 분사하는 인젝터(injector)는 x 방향과 y 방향 그리고 z 방향으로 각각 0.05 m , 0.05 m 그리고 0.024 m 위치에 있다. R은 충돌점을 기준하여 액적들의 반경방향으로의 침투정도를 나타내며, R_x 는 충돌점을 기준하여 왼쪽방향의 충돌 액적들의 반경방향으로의 침투정도를 나타내며 R_z 는 오른쪽 방향으로의 침투정도를 나타낸다. 계산에 사용된 충돌거리는 Katsura 등이 실험에서 사용한 동일한 값으로 처리하였으며, 그 값은 0.024 m 이다. 그 밖에 계산에 주어진 초기조건은 Katsura 등의 실험자료로서 Table 2에 나타냈다. timestep은 $10\ \mu\text{sec}$ 이며 각 timestep당 parcel의 개수는 20개로 처리하였다. 계산에 소요된 시간은 Iris R4000급 워크스테이션(workstation)으로 각각의 모델에 대하여 평균 400분 정도 소요되었다.

입구조건은 크게 액적조건, 분사속도와 분사각으로 나누어서 해석할 수 있다. 액적조건은 충돌 직전의 액적 크기를 $20\ \mu\text{m}$ 로 유지하기 위하여 Reitz의 방법을 응용하여 입구 노즐 크기에 대한 정규 분포로 가정하여 처리하였다. 분사속도는 Katsura 등의 조건을 주어서 해석한 경우에는 실험시에 주어진 분사압력에 대한 분포를 선형

Table 2 Katsura의 실험치

조건	값
노즐 홀의 갯수	1
홀의 직경 [mm]	0.3
평균 분사 압력 [MPa]	14
분사 시간 [ms]	1.2
분사연료량 [mm^3]	10.5
공기 밀도 [kg/m^3]	18.5
공기 압력 [MPa]	1.5
공기 온도 [K°]	300
충돌 거리 [mm]	24
충돌 각 [deg.]	0
벽 온도 [K°]	300

적으로 가정하여 오리피스 유동식을 적용하여 결정하였으며, 분사각은 Bracco의 실험식에 근거하여 결정하였다.

Fig. 3은 충돌시간이 $t = 1.2\text{ms}$ 이며, 충돌 분사각이 0° 로서 벽면에 분무를 수직하게 충돌시킨 경우이다. NR모델, WW모델, PW모델의 결과가 Katsura의 실험치(Fig. 12)와 모두 비슷한 형상을 보이고 있지만, PW 모델을 적용해서 얻은 결과가 NR과 WW 모델에 비해서 충돌하는 액적군의 두께가 더욱 크게 나타나 있어 실험치와 유사하게 나타나 있다. 그것은 PW 분무 충돌 모델이 다

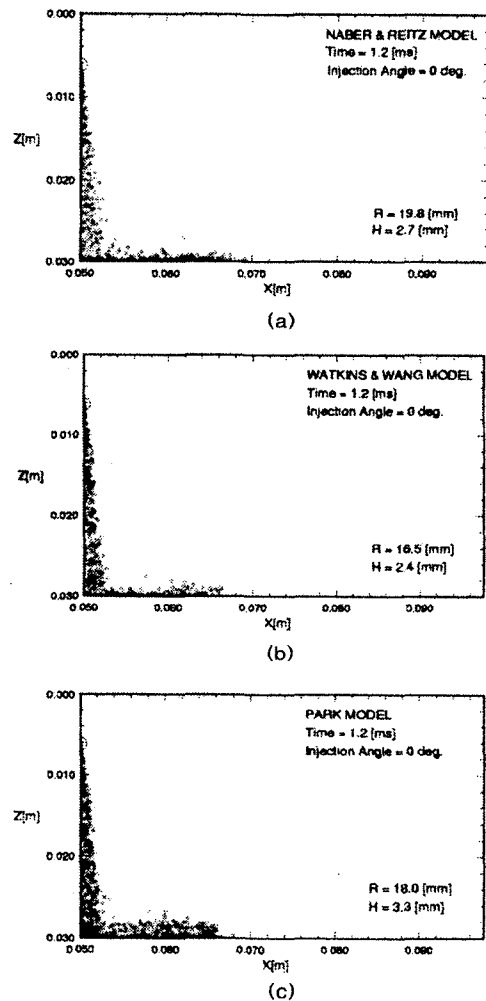


Fig. 3 Comparison of wall spray patterns for three different models at $t = 1.2\text{ms}$ [Injection angle = 0°]

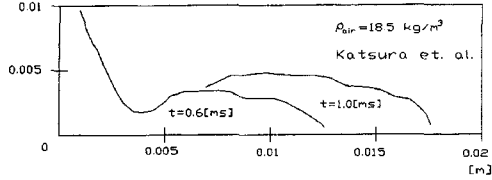


Fig. 4 Shape of impinged spray by Katsura experiment

른 두 모델과 다르게 벽면에 충돌한 분무액적들에 대해서 수직 방향으로 splash 효과를 모사하여 계산되었기 때문이며 이에 따라 분무액적들이 벽면에 충돌할 때 vortex에 의한 entrainment가 더욱 크게 발생하며 충돌 액적군의 유동이 위로 상승하기 때문이라고 판단된다. NR 충돌 모델을 적용한 결과를 보면 충돌 분무가 충돌점에서 하류 방향으로 침투 정도(R_{x_2})가 다른 두 모델에 비해서 가장 크게 나타나 있다. 이 모델에서는 분사된 액적들이 벽면에 충돌할 때에 발생하는 충돌 액적들의 에너지 손실을 전혀 고려하지 않아 충돌된 액적군이 실제보다 더욱 멀리 퍼져 간다고 판단된다. WW 충돌 모델은 We No.가 80보다 작은 영역에서는 벽에 충돌된 액적들의 에너지가 감소되어 반사되고, We No. 수가 80보다 큰 영역에서는 충돌 액적들이 많은 수의 더욱 작은 액적들로 분산된다고 가정하였다. 이 모델을 적용하여 얻은 결과들을 보면 분무액적들이 벽에 충돌할 때에 발생하는 액막의 속도를 전혀 고려하지 않았기 때문에 충돌 분무의 침투거리(R_{x_2})와 액적군의 두께(H_{x_2})가 다소 부적절하게 예측되었다.

Fig. 5는 충돌시간이 $t = 1.2ms$ 일 때 NR 충돌 모델, WW 충돌 모델 그리고 PW 충돌 모델들을 적용하여 얻은 결과를 top view로 나타내고 있으며, 충돌 분사각은 0° 이다.

NR 충돌 모델을 적용한 결과를 보면 충돌점에서 상하 및 좌우쪽 하류 방향으로 충돌 분무의 침투 거리가 다른 두 충돌 모델을 적용하여 얻은 결과에 비해서 더욱 넓게 나타나 있다. 그것은 이미 앞장에서 언급한 바 있지만 이 모델은 벽면에 충돌한 분무 액적들의 충돌에 의한 에너지 손실을 전혀 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

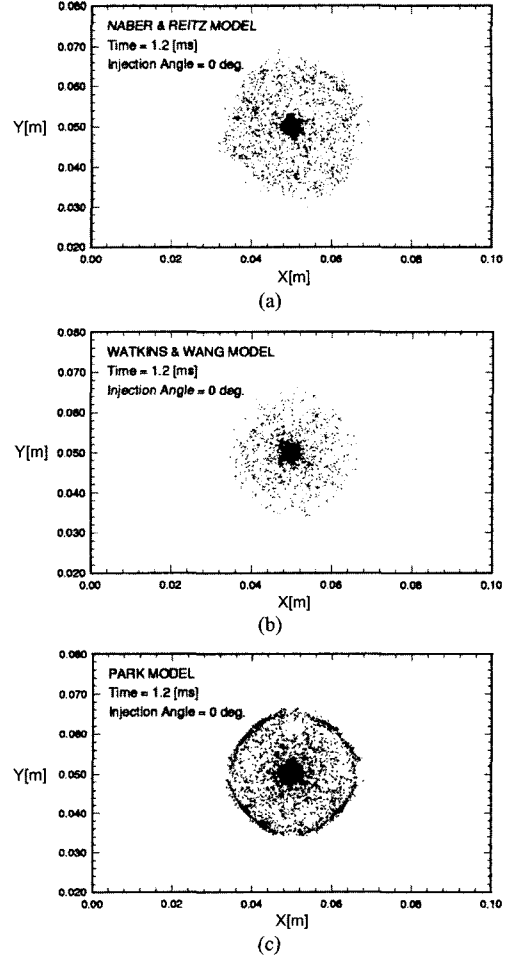


Fig. 5 Top view of spray patterns comparison for three different models at $t = 1.2ms$ [Injection angle = 0°]

PW 충돌 모델을 적용하여 얻은 결과를 보면 NR 충돌 모델과 WW 충돌 모델을 적용하여 얻은 결과에 비해서 충돌점 근처뿐만 아니라 원주의 바깥 가장자리 부근에 분무 액적들의 분포가 조밀하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 NR 충돌모델, WW 충돌모델 그리고 PW 충돌모델을 적용하여 얻은 결과로서 충돌 시간이 $2.0ms$ 까지 경과하면서 충돌점에서 하류 방향으로 분무 액적군의 침투 길이(R_{x_2})를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 NR 충돌모델을 적용한 결과가 전체 충돌시간대에 걸쳐서 다른 두 모델을 적용하여 얻은 결과에 비해서 실험치

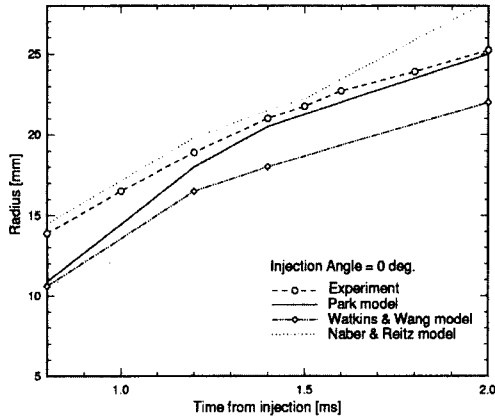


Fig. 6 Comparison of radius for three different models with experimental data with experimental data at injection angle, 0°

보다 상향 예측을 하고 있다. 특히 충돌시간이 경과함에 따라 기울기는 점차 증가하면서 충돌말기에서는 실험치에 더욱 크게 벗어나고 있는 것을 볼 수 있다. 그와 반대로 WW 충돌모델을 적용하여 얻은 결과는 실험치에 비해서 전체 충돌 시간대에 걸쳐 크게 하향 예측을 하고 있다. PW 모델을 적용하여 계산된 결과는 충돌시간 초기에는 크게 하향 예측을 하고 있으나 시간이 점차 경과할수록 실험치에 일치하고 있다. 특히 충돌시간이 $t = 2.0ms$ 에서는 거의 실험치에 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 충돌 액적군의 두께를 나타내고 있는데 세 가지 모델을 각각 적용하여 얻은 결과 모두가 전체 충돌시간대에 걸쳐 하향 예측하고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 NR 충돌모델과 WW 충돌 모델을 적용하여 계산된 액적군의 두께는 서로 비슷한 경향을 보이고 있으나 PW 충돌모델을 적용한 결과는 다른 두 모델을 적용한 결과 보다 실험치에 더욱 근사하고 있다. 결과로 미루어 볼 때 PW 충돌모델이 스플래쉬 효과(splash effect)를 잘 모사하고 있다고 판단된다.

그림에서 그래프가 꺾인 부분에 대해서는 계산에 필요한 데이터를 조밀하고 정확하게 추출하지 못했기 때문으로 판단된다.

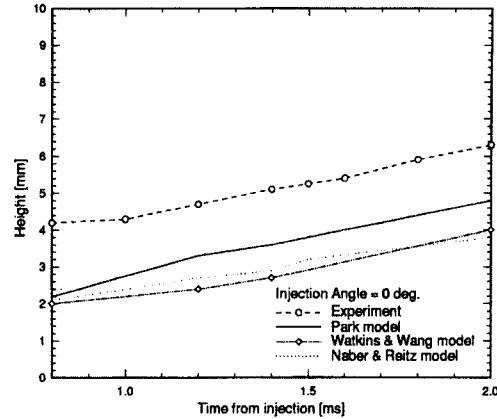


Fig. 7 Comparison of height for three different models at injection angle, 0°

3.2 분무를 경사각을 주어 충돌시킨 경우

Fig. 8과 Fig. 9는 측면 벽이 개방되어 있는 평판에 대해서 30° 로 분무 액적들을 충돌시킬 때 사용되는 격자계와 schematic diagram들을 나타내고 있다. 격자계의 크기와 경계조건은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같으며 격자계의 수는 $x \times y \times z$ 에 대하여 $50 \times 50 \times 40$ 개이다. Fig. 8(b)와 같이 격자계의 중심축을 기준으로 하여 왼쪽 방향에 비해서 오른쪽 방향으로 격자를 조밀하게 구성한 것은 분무 액적들을 오른쪽 평판 방향으로 분사각을 변화시키면서 분사시키기 위해서이다. 분사시에 인젝터에서 평판까지 분무의 충돌 거리는 Fig. 9(a)와 같이 Z_w 로 나타냈으며 $0.024m$ 로 고정시켰다. 따라서 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 인젝터(injector)의 높이와 위치는 분사각이 변화함에 따라 $Z_w \cos \beta$ 만큼씩 각각 달라진다. 그림에서 β 는 분사각을 나타내고 있으며 θ 는 분무각을 의미한다. 또한 H_{x_1} 은 충돌점을 기준으로 하여 왼쪽 방향의 충돌액적의 높이를 나타내며 H_{x_2} 는 오른쪽 방향의 높이를 나타낸다. R_{x_1} 은 충돌점을 기준으로 하여 왼쪽 방향의 충돌 액적들의 반경 방향으로의 침투 정도를 나타내며 R_{x_2} 는 오른쪽 방향으로의 침투 정도를 나타낸다. 그 밖에 계

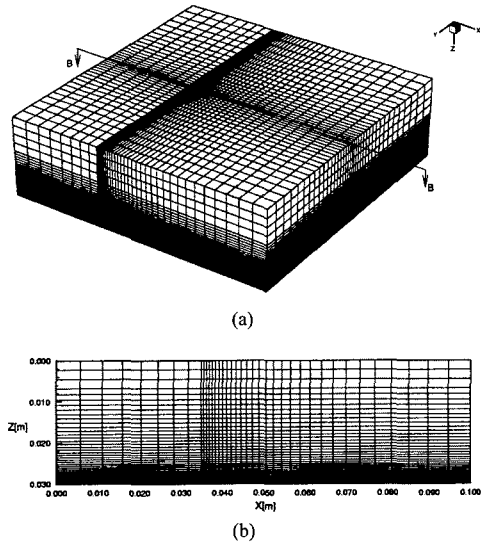


Fig. 8 Computational domain for 30° inclined impinging spray

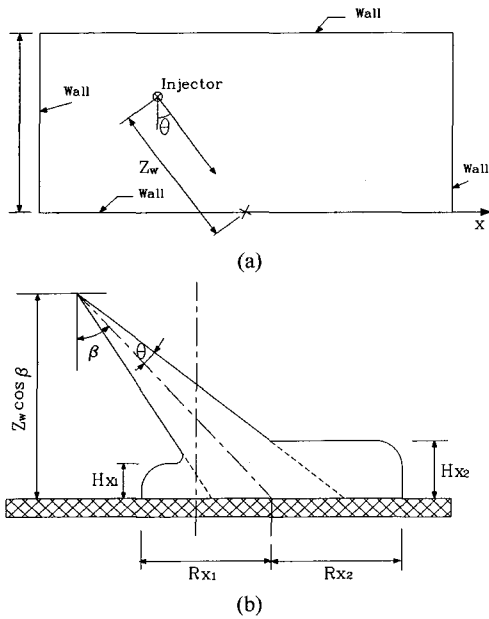


Fig. 9 Schematic diagrams for 30° inclined impinging spray

산에 주어진 초기조건은 Fujimoto 등의 실험자료로서 Table 3과 같다.

Fig. 10(a), Fig. 8(b) 그리고 Fig. 10(c)에서는 NR 충돌 모델, WW 충돌 모델 그리고 PW 충돌 모델

Table 3 Fujimoto의 실험치

조건	값
노즐 홀의 갯수	1
홀의 직경 [mm]	0.2
평균 분사 압력 [MPa]	13.8
분사 시간 [ms]	1.3
분사연료량 [mm ³]	8.2
공기 밀도 [kg/m ³]	18.5
공기 압력 [MPa]	1.5
공기 온도 [K°]	300
충돌 거리 [mm]	24
충돌 각 [deg.]	30
벽 온도 [K°]	300

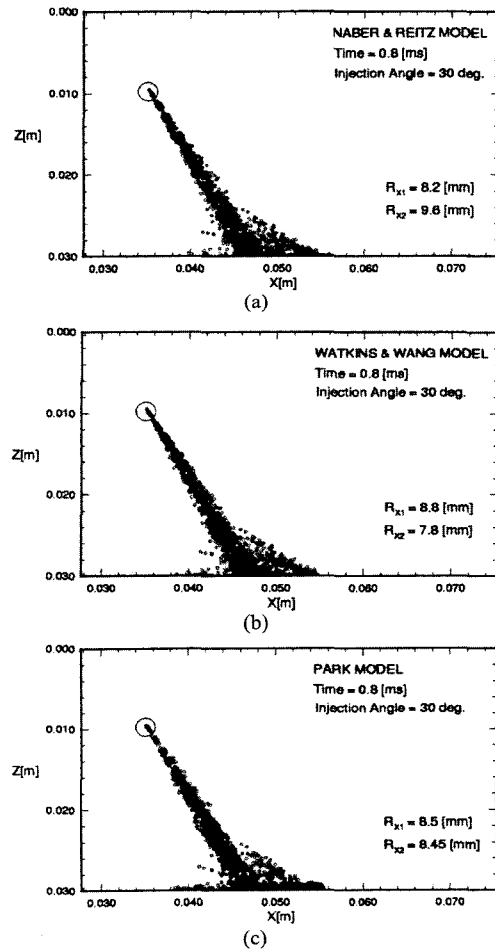


Fig. 10 Comparison of wall spray patterns for three different models at $t = 0.8ms$ [injection angle = 30°]

을 적용하여 얻은 벽면에서의 충돌 액적들의 거동을 나타내고 있다. 충돌시간은 $t = 0.8ms$ 이며 충돌 평판에 대한 분무 액적들의 경사각은 30° 이다. 그림에서 보여 주듯이 벽에 수직으로 분무가 충돌하는 경우(0°)보다 충돌점에서 오른쪽 하류 방향(R_{x2})으로 액적군이 더욱 많이 이동하였다. 그것은 분무가 벽에 충돌될 때 충돌하는 액적들이 주어진 경사각방향으로 다수가 반사되기 때문이라고 생각되며 좌우 방향으로의 침투 거리는 PW 충돌모델과 WW 충돌 모델의 경우에는 오히려 R_{x2} 보다 R_{x1} 이 다소 크고 NR 모델의 경우에서만 R_{x2} 가 크게 나타났다.

Fig. 11은 NR 충돌 모델, WW 충돌 모델 그리고 PW 충돌 모델을 적용하여 시간의 변화에 따라 얻은 액적군의 충돌 침투 길이(R_{x1})를 실험치와 비교하여 보여주고 있는데 이때의 분무각은 30° 이다. NR 충돌 모델을 적용하여 계산된 R_{x1} 을 보면 충돌초기에는 실험치에 비해서 상향 예측을 하다가 $t = 1.0ms$ 에서 부터는 시간이 경과함에 따라서 하향 예측을 보여주고 있다. WW 충돌 모델과 PW 충돌 모델을 적용하여 얻은 두 결과에서는 충돌 초기에는 실험치에 비해서 상향 예측을 하다가 시간이 경과함에 따라 다소 감소하는 경향을 보여주고 있다. 특히 PW 충돌 모델을 적용한 결과는 $t = 1.4ms$ 부터는 급격히 감소하여 충돌 말기에서는 실험치에 잘 일치하고 있다. Fig. 12에서는 충돌점에서 우측으로 분무 액적군의 침투 길이(R_{x2})를 나타내고 있는데 충돌 초기에서는 모두 실험치에 비해서 하향 예측을 하고 있다. NR 충돌 모델을 적용한 결과는 다른 두 모델을 적용하여 얻은 결과에 비해서 충돌 초기에는 실험치에 가장 근사하고 있으나 충돌시간이 $t = 1.02ms$ 부터는 시간이 점차 진행되면서 상향 예측으로 변하고 있는 것을 볼 수 있다. WW 충돌 모델과 PW 충돌 모델을 적용한 결과에서는 두 모델 모두가 충돌 초기에는 실험치에 비해서 하향 예측을 하다가 PW 충돌 모델을 적용하여 얻은 결과는 시간이 점차 진행되면서 실험치에 점

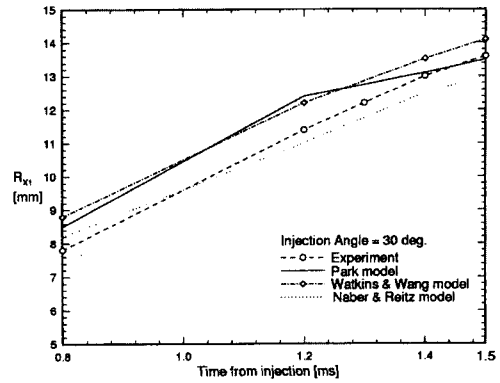


Fig. 11 Comparison of R_{x1} for three different models with experimental data at injection angle, 30°

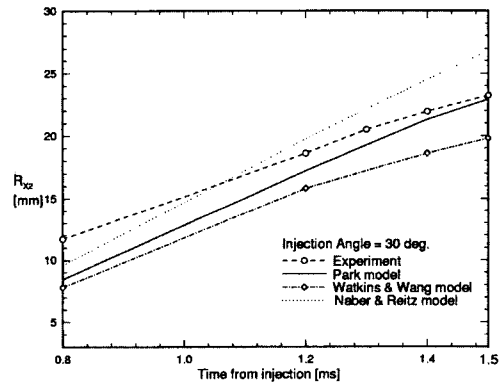


Fig. 12 Comparison of R_{x2} for three different models with experimental data at injection angle, 30°

근하다가 충돌시간이 $t = 1.5ms$ 근처에서는 실험치와 거의 일치하는 모습을 나타내고 있다.

3.3 tumble 유동이 액적의 거동에 미치는 영향

앞 절 분석에서 보았듯이 계산에 적용된 여러 충돌 모델들 중에서 PW 충돌 모델을 적용하여 얻은 결과가 다른 충돌 모델들을 적용하여 얻은 결과에 비해서 실험치에 잘 일치하였으며 충돌 액적들의 거동을 적절하게 예측할 수 있는 모델이라 판단되었다. 따라서 본 절에서는 PW 충돌 모델만을 이용하여 정적인 조건에서 분사각을 15° , 30° 그리고 45° 로 변화하면서 측면 벽이 없는 개방된 충돌 벽에 분무 액적들을 충돌시켜 충

돌 벽 근처에서의 충돌 분무의 거동과 상호 작용에 대해서 분석하였다.

또한 실린더의 벽으로 인하여 발생하는 tumble 형태의 유동과 충돌 액적간의 상호 작용과 tumble 유동에 의한 충돌 액적군의 거동 변화를 예측해보기 위하여 실린더 내의 벽에 분무 액적들을 분사시켜 그 결과를 정성적으로 분석하였다. 계산에 주어진 충돌 분사각은 15° , 30° 그리고 45° 이며 충돌거리와 노즐 출구에서의 액적 크기 및 분사 압력 등은 측면 벽이 개방되어 있는 경우에는 Fujimoto 실험조건과 동일하게 주었다. 그리고 동일한 분사각내에서 분무 액적들을 측면 벽이 개방되어 있는 충돌 벽에 충돌시켜 얻은 결과와 실린더에 적용하여 얻은 결과를 상호 비교함으로써 측면 벽의 효과에 대한 기상과 분무 액적군(액상)의 거동에 대해서도 함께 살

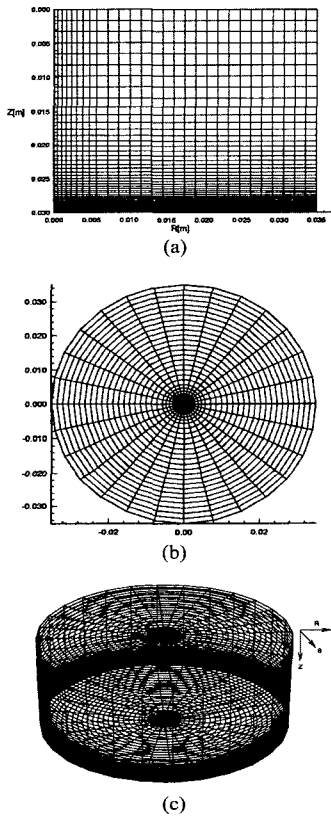


Fig. 13 Computational grids for impinging spray in the cylinder

펴보았다.

Fig. 13은 계산에 사용한 실린더의 전체 계산 격자계, 평면도 그리고 정면도를 나타내고 있다. 계산 격자계는 3차원 실린더로 크기는 r 방향과 z 방향으로 각각 $0.035m$ 와 $0.030m$ 로 주어졌다. 격자수는 $r \times \theta \times z$ 에 대하여 $30 \times 30 \times 50$ 개이다. 계산에 주어진 초기조건은 Table 4와 같으며 경계조건은 $z = 0m$ 와 $r = 0.035m$ 에서는 고정 벽면조건으로 처리하였다. Fig. 14는 계산에 사용한 실린더의 schematic diagram을 나타내고 있다.

Fig. 15는 충돌 시간이 $t = 2.0ms$ 일 때 분사각을 15° , 30° 그리고 45° 로 변화시키면서 실린더 내의 충돌 분무의 거동과 기상의 속도를 나타내고 있다. 분사각이 작은 15° 에서는 속도 분포의 크기가 충돌점을 중심으로 좌우 방향으로 비슷하게 형성되어 있으나 분사각이 증가할수록 오른쪽 영역에 tumble 유동이 크게 형성되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 16에서는 Fig. 15와 동일 조건에서 적용하여 계산된 난류 운동 에너지를 나타내고 있다. 전체적으로 분사각이 작을수록 난류 운동 에너지는 우측 벽 부근의 영역에서 넓게 분포되어 있으며 분사각이 클수록 벽 근처에 크게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 17은 분무 액적들에 의한 기상의 vortex 강도를 나타내고 있다. 충돌 시간과 분사각은 Fig. 15와 동일하며 분사각이 클수록 vortex core가 우측 벽 가까이에서 크게 확장되고 있으며 우측 벽

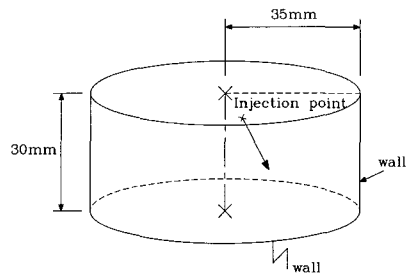


Fig. 14 Schematic diagram for impinging spray in the cylinder

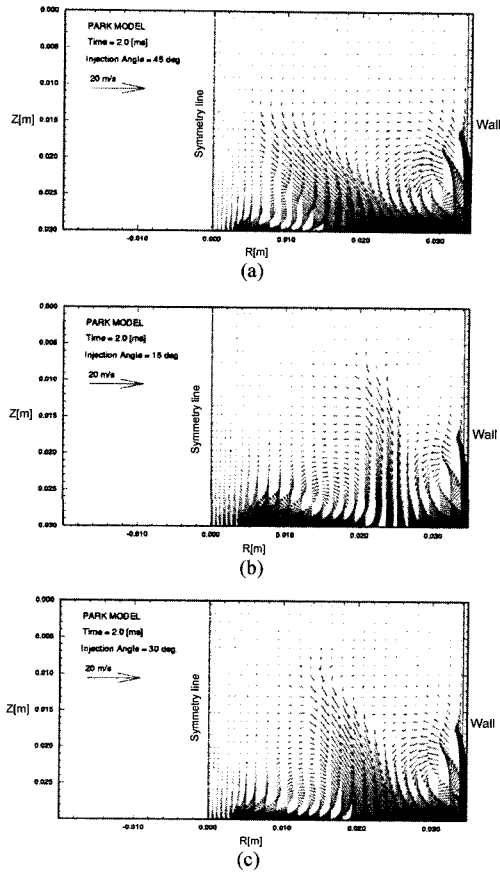


Fig. 15 Comparison of impinging spray patterns in the cylinder at $t = 2.0ms$ (injection angles = 15° , 30° , 45°)

부분에도 윗쪽으로 더욱 높게 확산되어 있다.

마지막으로 Fig. 18은 PW 충돌 모델을 이용하여 충돌 시간 말기($t = 2.0ms$)에 분사각을 변화시키면서 실린더 내에 충돌되는 분무 액적들의 거동을 나타내고 있다. 분사각이 작은 15° 에서는 충돌점에서 좌측으로 액적군이 30° 와 45° 에 비해서 많이 형성되어 있다. 분사각이 클수록 대부분의 액적군이 우측에 크게 형성되어 있으며 우측 벽에 충돌되어 tumble 유동과 함께 벽을 타고 위로 상승하고 있으며 실린더 안쪽으로 크게 회전하면서 거동하고 있다. 이와 같은 현상은 액적들간에 분산을 야기시켜 2차 미립화를 발생시킬 수 있다고 판단된다.

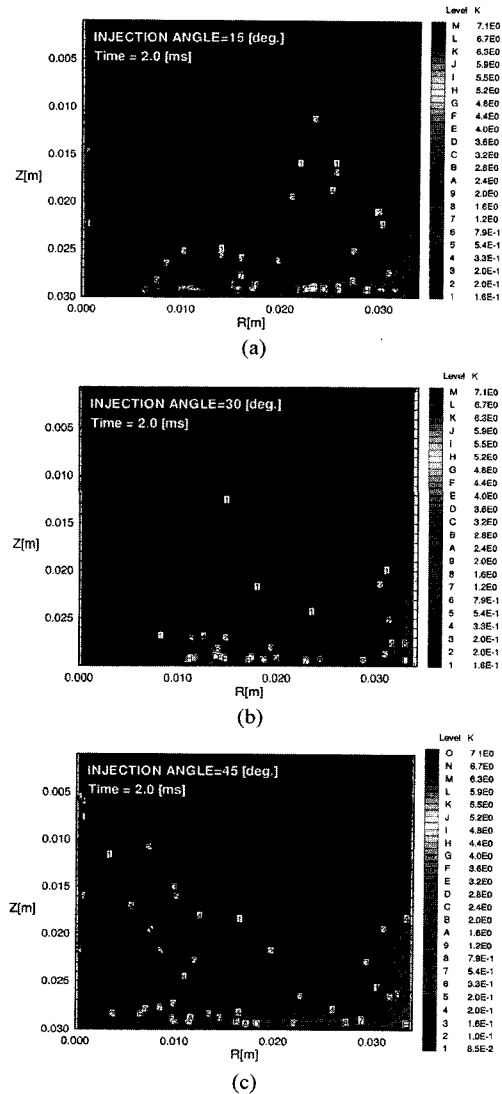


Fig. 16 Turbulent kinetic energy contour of impinging spray in the cylinder at $t = 2.0ms$ (injection angles = 15° , 30° , 45°)

4. 결 론

4.1 수직방향(0°)으로 분무를 충돌시켰을 때

1) NR 모델의 경우

충돌점에서 충돌분무의 하류 방향 침투 정도 (R_{x2})가 다른 두 모델에 비해서 가장 크게 나타난다. 이 모델에서는 분사된 액적들이 벽면에 충돌

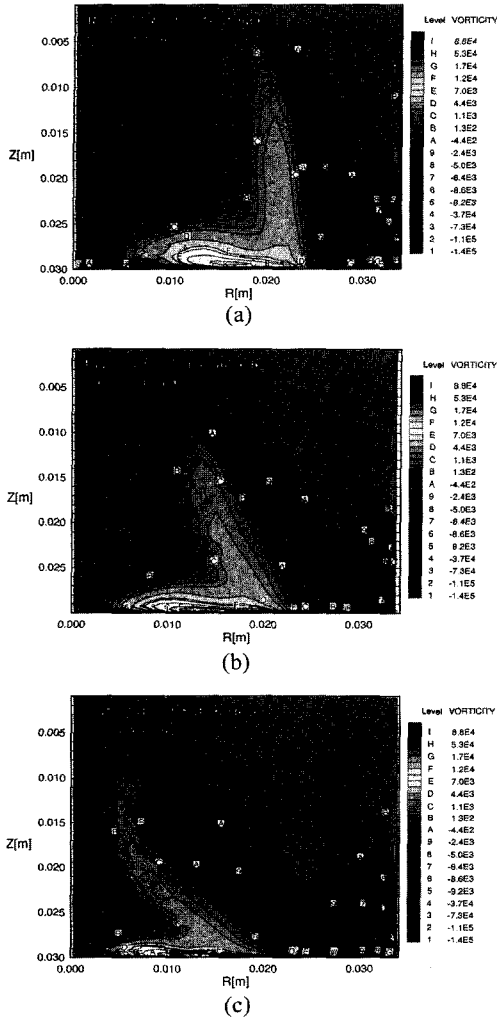


Fig. 17 Vorticity contour of impinging spray in the cylinder at $t=2.0ms$ (injection angles = $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)

할 때에 발생하는 충돌 액적들의 에너지 손실을 전혀 고려하지 않아 충돌된 액적군이 실제보다 더욱 멀리 퍼져 간다고 판단된다.

2) WW 모델의 경우

분무액적들이 벽에 충돌할 때에 발생하는 액막의 속도를 전혀 고려하지 않았기 때문에 충돌 분무의 침투거리(R_{x_2})와 액적군의 두께(H_{x_2})가 다소 부적절하게 예측되었다.

3) PW 모델의 경우

NR과 WW 모델에 비해서 충돌하는 액적군의

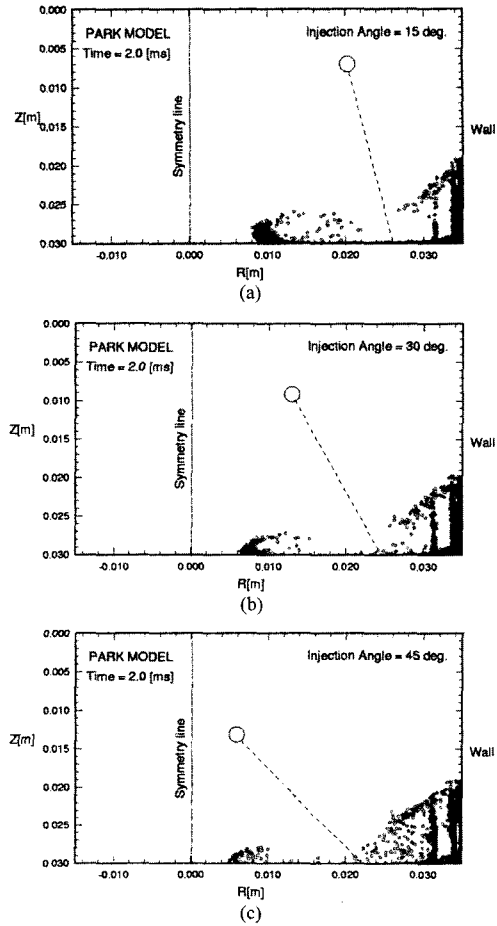


Fig. 18 Velocity vector into cylinder at $t = 2.0ms$ (injection angles = $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)

두께가 더욱 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그것은 PW 분무 충돌 모델이 다른 두 모델과 다르게 벽면에 충돌한 분무액적들에 대해서 수직 방향으로 splash 효과를 모사하여 계산되었기 때문이며 이에 따라 분무액적들이 벽면에 충돌할 때 vortex에 의한 entrainment가 더욱 크게 발생하며 충돌 액적군의 유동이 위로 상승하기 때문이라고 판단된다.

4.2 경사각을 주어 분무를 충돌시켰을 때

벽에 수직으로 분무가 충돌 하는 경우(0°)보다 충돌점에서 오른쪽 하류 방향(R_{x_2})으로 액적군이 더욱 많이 이동하였다. 그것은 분무가 벽에 충

돌릴 때 충돌하는 액적들이 주어진 경사각쪽으로 다수가 반사되기 때문이라고 생각되며 좌우 방향으로의 침투거리는 PW 충돌모델과 WW 충돌 모델의 경우에는 오히려 R_{x_2} 보다 R_{x_1} 이 다소 크고 NR 모델의 경우에서만 R_{x_2} 가 크게 나타났다.

4.3 실린더내의 tumble 유동

실린더 내로 충돌한 분무 액군의 양 끝단에는 vortex가 형성되었다. 이러한 현상은 충돌 벽 쪽으로 향하는 분무 액적들의 속도가 측면 벽 효과에 의해서 지체되기 때문이다. 또한 충돌 후 충돌 벽에 접선방향속도 성분은 줄어들고 수직방향으로 속도가 증가하여 충돌 분무가 벽면 위쪽으로 밀려가기 때문이다. vortex는 시간이 경과함에 따라 실린더 우측 벽으로 이동하여 상승하면서 실린더의 안쪽으로 회전하는 경향을 보였다.

분사각이 클수록 기상의 속도 분포와 tumble 유동이 측면 벽에서 크게 형성되는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 2002학년도 군장대학 특성화사업을 담당하고 있는 부설 자동차기술정보센터의 산·학·연 연구지원비에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. D. Naber, R. D. Reitz, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE 880107, 1988.
- 2) L. H. J. Wachters, N. A. J. Westerling, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in a Spherical State," Chem. Eng. Sci., Vol.21, pp.1047-1056, 1966.
- 3) A. P. Watkins, D. M. Wang, "A New Model for Diesel Spray Impaction on Walls and Comparison with Experiment," Proc. COMODIA 90 Int. Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in I.C. Engines, Kyoto, Japan, pp.243-248, 1990.
- 4) A. D. Gosman, K. Y. Huh, B. S. Tabrizi, Q-F. Zhang, "The EPISO-SPRAY Computer Code for Prediction of Fuel Spray and Air Motion in Motored Internal Combustion Engines," Manual for EPISO-SPRAY Code, 1987.
- 5) P. J. O'Rourke, A. A. Amsden, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 873089, 1987.
- 6) K. Park, A. P. Watkins, "Comparison of Wall Spray Impaction Models with Experimental Data on Drop Velocities and Sizes," Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.17, No.5, 1996.
- 7) A. P. Watkins, D. M. Wang, "A New Model for Diesel Spray Impaction on Walls and Comparison with Experiment," Proc. COMODIA 90 Int. Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in I.C. Engines, Kyoto, Japan, pp.243-248, 1990.
- 8) J. D. Naber, R. D. Reitz, "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE 880107, 1988.
- 9) N. Katsura, M. Saito, J. Senda, H. Fujimoto, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," SAE 890264, 1989.
- 10) H. Fujimoto, J. Senda, M. Nagae, A. Hashimoto, M. Saito, N. Katsura, "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, 1990.
- 11) J. K. Dukowicz, "A Particle-Fluid Numerical Method for Liquid Sprays," J. Comp. Phys., Vol.35, No.2, pp.229-253, 1980.
- 12) R. D. Reitz, R. Diwakar, "Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays," SAE 860469, 1986.
- 13) P. J. O'Rourke, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Ph. D. Thesis of Princeton Univ., 1981.