

## 벽면에 충돌하는 분무의 미립화에 관한 수치적 모델

### A Numerical Model for Atomization of an Impinging Spray on the Wall

조미옥\*, 허강열\*\*

Joh Miok, Kang Y. Huh

#### ABSTRACT

A spray-wall impingement model for fuel sprays is proposed and implemented as a module into the KIVA-POSTECH code. The model is based on the single droplet experiments. The droplet behaviors after impingement are determined from experimental correlations. Different behaviors of impinged droplets depend on the wall temperature and the critical temperature of the fuel. Fuel film formation is taken into account so that the model can be applicable to any wall temperature and injection conditions. Computational results on a normal and on inclined wall are in good agreement for the spray shape and penetration. More validation against experiments and development of the heat transfer model are needed for further improvement.

주요기술용어 : Wall-impingement(벽충돌), KIVA-POSTECH code, Diesel engine(디젤 기관)

#### 1. 서론

분무의 벽면 충돌 현상은 분사 시스템이 사용되는 거의 모든 기술 분야에서 상당한 중요성을 갖는 것으로 알려져 있으며, 전산 유체 역학과 고성능 컴퓨터의 발달로 인하여 산업의 각 분야에서 수치 해석을 통한 연구 개발의 비중이 커지고 있다. 본 연구에서는 일반적인 3차원 수치 해석 도구에 적용 가능하도록 벽면 충돌 분무의 미립화 현상에 관한 모델을 수립하고, 이를 KIVA-POSTECH 코드에 적용하였다.

내연 기관에서의 분무와 연소실 벽면 등의 충돌에 관한 연구는 직접 분사식 디젤 기관을 중심으로 80년대 이후 본격적으로 여러 가지 방향에서 진행되어 왔다. Katsura et al.<sup>(1)</sup>은 디젤 연료를 사용한 수직 충돌 분무 실험을 수행하고 분위기 압력 및 밀도, 충돌 거리, 분사압 등의 변화에 따른 충돌 분무의 거동을 분석하였다. Fujimoto et al.<sup>(2)</sup>은 수직 및 기울어진 벽면과의

충돌 실험을 수행하였고, Senda et al.<sup>(3)</sup>은 고온 고압 상태 (700 K, 2.5 MPa)에서의 벽 충돌 분무의 증발 현상을 가시화하였다. 분무-벽 충돌 현상의 메커니즘을 보다 잘 이해하려는 노력으로 Naber et al.<sup>(4)</sup>은 단일 액적의 뜨거운 벽면 충돌에 관한 실험을 수행하고 breakup에 의하여 생성되는 액적들의 갯수, 크기 및 속도 분포를 조사하였다.

3차원 수치 해석 분야에서는 1988 년에 Naber & Reitz<sup>(5)</sup>가 기존의 KIVA-II 코드<sup>(6)</sup>에서 사용된 stick 모델을 개선하여 reflect 모델과 jet 모델을 제시하였다. stick 모델에서는 벽면에 충돌한 분무 입자가 충돌후 그대로 부착되어 증발한다고 가정하여 고속으로 운전 중인 내연 기관 내의 분무-벽 충돌 현상을 잘 재현하지 못했다. 뿐만 아니라 고속 충돌로 인한 분무 입자의 미립화나 벽면 분무막의 형성 등 연료의 증발에 있어서 매우 중요한 요소들을 고려하지 못하였으므로 연료 증기 분포와 같은 실질적으로 유용한 정보

\* 포항공대 대학원

\*\* 포항공대 기계공학과

를 제공하는 데 있어서 정확성을 보장할 수 없었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 제안된 reflect 모델에서는 분무 입자가 충돌 후 에너지의 손실 없이 충돌 전과 같은 속도로 되튀긴다고 가정하였으며, jet 모델의 경우는 충돌 분무가 벽면을 따라서 충돌 전과 같은 크기의 속도를 가지고 퍼져 나간다고 가정하였다. 당시 제안된 이 두 모델은 모두 분무와 벽면의 충돌에 의한 에너지 손실을 전혀 고려하지 않음으로써 분무가 실제보다 훨씬 더 멀리 퍼져 나가는 경향이 있었고, Naber et al.<sup>(7)</sup>은 충돌 후 벽면에 수직인 방향으로의 속도 성분을 도입함으로써 jet 모델을 개선하여 사용하였다.

한편 최근에 Bai & Gosman<sup>(8)</sup>은 단일 액적 실험에 근거하여 벽면의 상태에 따라 dry wall과 wetted wall로 구분하고 각각의 경우에 대하여 서로 다른 분무의 거동을 가정한 모델을 제시하였다. 또한 운동량과 에너지 보존개념을 도입하여 충돌 후 분무의 속도 등을 결정하는 점이 다른 모델들과 구분되는 특징이다. Bai & Gosman 모델에서는 벽면에 분무막이 형성되는 경우도 고려하고 있으나 관련된 열전달 현상에 관해서는 언급하지 않았다. Senda et al.<sup>(9)</sup> 또한 벽면에 형성되는 액막을 고려한 충돌 모델을 제안하고 KIVA-II 코드에 적용한 사례를 발표하였다.

본 논문에서 제안된 모델은 개별 액적 충돌 실험에 근거하여 충돌 벽면의 온도에 관계 없이 적용할 수 있도록 분무의 입계 온도와 충돌 벽면의 온도비에 따라 달라지는 분무의 거동을 고려하였다. 벽면의 온도가 분무의 입계 온도보다 낮은 경우 표면에 분무 액막이 형성되는 현상을 고려하기 위하여 변수  $K = Oh \cdot Re^{1.25}$ 의 값에 따라 벽면 부착(stick regime) 또는 여러개의 입자로 쪼개져서 되튀김(splash regime)을 가정하였고, 벽면의 온도가 높은 경우 충돌전 분무의 운동 에너지와 표면 장력 에너지의 비로 나타내어지는 웨버수에 따라 깨짐 없이 되튀기거나(rebound regime) 여러개의 입자들로 쪼개지는(breakup regime) 영역으로 구분하였다. 분무 거동 영역을 구분하는 변수  $K$  및  $We$  값을 결정하는 데는 충돌 전 벽면에 수직인 방향으로의

속도 성분을 사용하였다.

## 2. 해석 코드

본 연구에 사용된 3차원 수치 해석 도구는 1989년 미국의 Los Alamos 국립 연구소에서 개발, 공개된 KIVA-II 코드를 근간으로 한 KIVA-POSTECH 코드로서, 계산 효율을 증대시킨 multiblock 구조로 임의의 3차원 형상 및 경계 조건의 사용이 가능하며, Lagrangian 벨브 처리 기법, 분무의 미립화 및 벽 충돌 모델, 예혼합 및 확산 연소 모델 등을 보완하였다.

KIVA-POSTECH은 공간 차분법으로 ALE (arbitrary Lagrangian-Eulerian) 방법<sup>(10)</sup>과 대류항에 대한 explicit subcycling 방법을 사용하여 대류항에 의한 수치 확산을 줄이고 계산의 안정성을 기할 수 있도록 하였으며, 난류 모델로는 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하고 있다.

분무 현상의 수치적 모사는 KIVA-II에서와 같이 분무 액적을 초기 온도, 질량 등 같은 물리량을 갖는 입자들이 모인 3000-5000개의 parcel로 대표하여 나타내고, 각각의 parcel에 대하여 stochastic Lagrangian 방법을 적용하여 시간에 따른 분무 전체의 거동을 구함으로써 가능하다. 또한 분무 입자와 난류 유동장과의 상호 작용이나 분무의 증발, breakup<sup>(11)</sup>과 분무 입자들간의 collision/coalescence<sup>(12)</sup> 등의 현상들을 고려할 수 있다.

## 3. 분무-벽 충돌 모델

충돌 분무의 거동을 결정하는 주요 요인으로는 다음과 같은 변수들이 알려져 있다.

$$\text{Reynolds 수} : Re = \frac{\rho d_0 w_0}{\mu}$$

$$\text{Ohnesorge 수} : Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d_0}}$$

$$\text{표면 거칠기} : S_f = \frac{R_f}{d_0}$$

$$\text{온도비} : \frac{T_{crit}}{T_{wall}} \cdot \frac{T_p}{T_{crit}}$$

$$\text{Weber 수} : We = (Oh \cdot Re)^2 = \frac{\rho d_0 w_0^2}{\sigma}$$

본 논문에서 사용된 분무-벽 충돌 모델은 단일 액적 실험에 기초하여 충돌전 분무의 운동 에너지에 의하여 충돌 후 분무의 거동이 결정된다는 가정으로부터 출발하였다.

운전중인 엔진의 경우 연소실 벽면의 온도는 거의 일정하게 유지되는 반면 연소실 내의 온도와 압력 값은 분사 시기에 따라 크게 달라지므로 분무의 입계 온도 또한 분사 조건에 따라 변화하게 된다. 벽면의 온도와 분무의 입계 온도 간의 비에 따라 충돌 분무가 다른 거동을 보이게 된다는 실험 결과를 고려하여, 본 연구에서는 벽면 온도에 따라 cold wall과 hot wall로 구분하고 각각의 경우에 대하여 관련 실험 결과로부터 충돌 후 분무의 거동을 결정하였다.

### 3. 1 Cold wall model ( $T_{wall} < T_{crit}$ )

벽면의 온도가 연료의 입계 온도보다 낮은 경우로, Mundo et al.<sup>(13, 14)</sup>의 단일 액적 실험 결과를 기반으로 하여 충돌전 분무의 에너지에 따라 벽면에 부착되거나 여러개의 작은 입자로 쪼개져서 되튀긴다고 가정하였다. 이때 분무의 벽면 부착 여부를 결정하는 변수 K는 아래와 같이 Ohnesorge 수와 Reynolds 수의 함수로 표현된다.

$$K = \sqrt{We} \cdot \sqrt{Re} = \left( \frac{\rho^3 d^3 u^5}{\sigma^2 \eta} \right)^{0.25} = Oh \cdot Re^{1.25} \quad (1)$$

또한 dry wall과 wetted wall에 충돌하는 분무의 서로 다른 특성을 고려하기 위하여, 일정량 이상의 액막이 형성되면 wetted wall로 가정하고 되튀기는 분무의 질량, 반경, 입자수, 속도 등을 dry wall에 충돌하는 경우와 다르게 하였다.

내연 기관의 연소실 벽면은 smooth surface (surface roughness factor  $S_r \approx 0.03$ )로 가정하였으며, 벽면 액막이 어느 정도 생성된 후에는 rough surface에서와 같은 충돌 특성을 갖는다

고 가정하였다.

#### 3. 1. 1 Stick regime ( $K < 57.7$ )

충돌 분무가 벽면에 그대로 부착되어 액막을 형성하게 된다. 액막의 형성에 의하여 달라지는 분무 증발에 관련된 열전달 메커니즘의 영향은 현재로서는 고려하지 않았다.

#### 3. 1. 2 Splash regime ( $K \geq 57.7$ )

충돌 분무의 에너지가 커질수록 많은 수의 입자로 쪼개지면서 되튀기게 되는데, 고압 분사가 이루어지는 디젤 기관에서의 대부분의 벽충돌 분무가 이 영역에 해당된다. 충돌에 의하여 생성되는 많은 수의 입자의 거동을 수치적으로 모사하기 위하여 충돌 후 같은 질량을 갖는 두 개의 parcel로 나누어서 각각의 거동을 추적하였다. 또한 일정량 이상의 액막이 형성되면 wetted wall로 가정하고 되튀기는 분무의 질량과 속도 성분을 결정하였다.

충돌 후 되튀기는 질량비는 아래와 같이 벽면의 상태에 따라 다른 것으로 가정하였다.

$$\text{dry wall} : \eta = 3.9896 \cdot 10^{-21} K^{9.2133} \quad (2)$$

$$\text{wetted wall} : \eta = 8.0350 \cdot 10^{-11} K^{4.1718} \quad (3)$$

위의 식 (2)와 (3)에서  $\eta = \frac{m_{\text{splash}}}{m_{\text{impinge}}}$ 로 전체

충돌 질량 중 되튀기는 분무의 양을 나타낸다.

또한 충돌 분무의 벽면에 나란한 방향으로의 충돌전 진행 방향과 그 반대 방향에 대하여 서로 다른 크기의 분무 입자를 사용하여 모사함으로써, 수직 충돌이 아닌 경우에 대하여 정확한 결과를 얻을 수 있도록 하였다.

### 3. 2 Hot wall model ( $T_{wall} \geq T_{crit}$ )

뜨거운 벽면에 충돌하는 단일 액적의 충돌 후 에너지 손실은 웨버수에 관계없이 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다<sup>(15)</sup>.

$$\frac{V_a^m}{V_b^m} = 1 - x \cos^2 \beta \quad (4)$$

위의 식 (4)에서  $\beta$ 는 액적 속도 벡터와 충돌면의 수직 단위 벡터가 이루는 각이며,  $x$ 는 Wachters et al.<sup>(16)</sup>에 의하여 충돌 전과 충돌 후의 수직 속도 성분들간의 관계에서 실험적으로 얻어진 계수로서, 충돌전 웨버수의 함수로 주어진다.

충돌면에 수직인 방향으로의 속도 성분에 의해 정의되는 웨버수는 다음과 같다.

$$We_b = \frac{\rho V_b^m D_{ab}}{\sigma} \quad (5)$$

위의 식 (5)에서  $D_{ab}$ 는 충돌 전의 분무 직경이며  $\sigma$ 는 표면 장력을 나타낸다. 위에서 정의한 웨버수의 영역에 따라 충돌 분무의 거동은 stable rebound regime과 unstable rebound regime으로 나눌 수 있으며 각각 다음과 같이 모사하였다.

### 3. 2. 1 Stable rebound regime ( $We_b < 80$ )

충돌 전 웨버수가 80보다 작은 경우에는 분무가 깨지지 않고 벽면으로부터 되튀기게 되는데, 이 때 분무가 가지고 있던 대부분의 에너지가 충돌 에너지로 손실되므로 되튀기는 속도는 실질적으로 충돌 전의 속도값에 비하여 매우 작다. 충돌 후 속도의 수직 성분은 웨버수에 따라 충돌로 인한 에너지 손실 효과를 고려한 식 (4)에 의하여 결정되고, 수평 성분은 충돌 전의 속도 크기를 유지한다고 가정하였다.

### 3. 2. 2 Unstable breakup regime ( $We_b \geq 80$ )

충돌 전 웨버수가 80보다 큰 경우에는 분무가 여러 개의 작은 입자로 깨지면서 퍼져나가게 되는데, 이를 모사하기 위하여 cold wall model에서와 유사하게 하나의 parcel이 충돌 후 같은 질량과 입자수를 갖는 두 개의 parcel로 쪼개진다고 가정하였다. 새로이 생성되는 parcel 내의 입

자수는 실험 결과에 의한 관계식으로부터 도출하였으며 일반적으로 입자의 충돌 에너지가 클수록 breakup에 의해 생성되는 입자수는 증가하게 된다. 디젤 기관에서 사용되는 고압 분사기에 의한 분무의 속도는 일반적으로 매우 크므로 hot wall에 충돌하는 대부분의 충돌 분무는 unstable breakup regime에 해당하게 되며, 속도 성분은 각각 다음과 같이 결정하였다.

수직 성분 :

$$(V_a^n)_{unstable}^1 = (V_a^n)_{unstable}^2 = \alpha (V_a^n)_{stable} \quad (6)$$

수평 성분 :

$$(V_a^n)_{unstable}^{1,2} = V_b^n \pm V_{scattering}^n \quad (7)$$

즉, 수직 방향의 속도 성분은 stable rebound regime에서의 성분을 구한 후 그 값의 임의의 fraction으로 결정하였으며, 수평 방향으로는 충돌전 속도 성분에 필름 속도의 random fraction을 더하거나 뺀 것으로 두 parcel의 속도 성분을 결정하였다. 충돌면에 평행한 방향으로의 속도 벡터의 방향은  $[0, 2\pi]$ 의 각도 내에서 임의로 결정하고 나머지 parcel에 대해서는 정반대 방향이 되도록 하였다. 충돌면에 수직인 방향으로의 속도 성분을 결정하는 식 (6)에서  $\alpha$ 는  $[0, 1]$  구간의 난수이며, 식 (7)의  $V_{scattering}^n$ 은 다음과 같은 필름 속도의 random fraction으로 결정된다. 아래의 식 (8)에서 필름 속도는 액적이 벽면에 충돌한 후 breakup 되기 직전 필름을 형성하면서 수평 방향으로 퍼져 나갈 때의 속도로서, Wachters et al.<sup>(16)</sup>에 의하여 실험적으로 얻어진 데이터로부터 도출하였다.

$$V_{film} = 0.835(3.096 - 2\chi) V_b^n \quad (8)$$

식 (8)에서  $\chi$ 는  $V_b^n$ 의 함수로 알려져 있으며  $\chi$ 값의 결정은 보다 많은 실험과 계산을 통해 일반화가 요구되는 부분이다.

이상의 분무-벽 충돌 모델은 단일 액적에 관

한 실험에 기초한 것으로서 액적들 간의 상호 작용과 경계층 효과는 무시하였다.

KIVA-POSTECH에 입력된 분무-벽 충돌 모델은 피스톤을 포함한 임의의 벽면 방향과 모양에 대하여 적용 가능하며, 매 시간 스텝에서 분무 입자가 벽면을 통과하게 되면 위에서 기술한 거동 영역에 따라 분무 입자의 새로운 위치를 결정해 주는 방법으로 수행하였다.

#### 4. 검증 계산 및 결과

본 연구에서는 분무 액적의 breakup<sup>(11)</sup>, collision/coalescence<sup>(12)</sup> 모델들을 사용하지 않고 분무 초기부터 Sauter mean radius를 기준으로 주어진 확률 밀도 함수에 따라 일정한 분포를 갖는 입자들이 분사되는 것으로 가정하였다. 이러한 방법은 실험적으로 구한 Sauter mean radius 값이 주어지는 경우 breakup 및 collision/coalescence 모델에 의한 확률적 불확실성을 배제할 수 있어 분무와 관련된 모델의 검증 계산에 유용하다고 판단된다.

##### 4.1 수직 벽면 충돌 분무

Table 1 Test conditions of impinging spray (normal impingement)

	case1	case2	case3
평균 분사압(MPa)	14.0	14.0	14.0
분사 시간(ms)	1.20	1.20	1.20
분사량(mm <sup>3</sup> )	10.5	10.5	10.5
분위기 압력(MPa)	0.75air	1.5air	1.5CO <sub>2</sub>
분위기 밀도(kg/m <sup>3</sup> )	9.23	18.5	28.1
충돌 거리(mm)	24	24	24
분사 노즐	직경(mm) 0.3		
	분위기 온도(K) room temperature		

분무-벽 충돌 모델의 타당성을 입증하기 위하여 벽면 수직 충돌에 관한 계산을 3가지 다른

분위기 압력 및 밀도 조건에 대하여 수행하고 이를 Katsura et al.<sup>(11)</sup>의 실험 결과와 비교하였다.

각 실험 조건과 계산 격자는 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

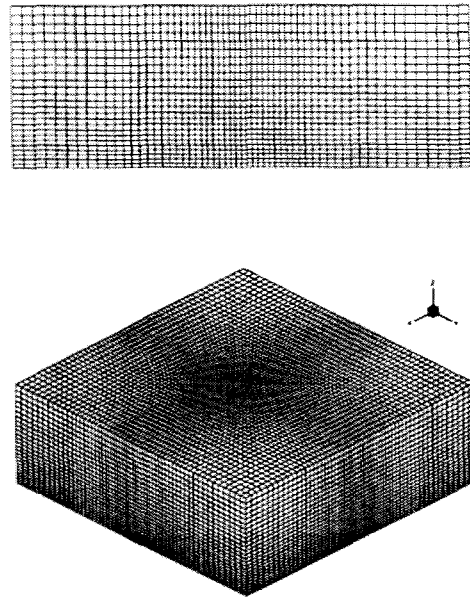


Fig. 1 Computational grid

Fig. 2는 분위기 압력의 변화에 따른 충돌 후 분무의 거동 양상에 대한 계산 및 실험 결과이다. 계산 결과는 실험 결과와 마찬가지로 분위기 압력이 높아질수록 충돌 후 분무의 벽면에 평행한 방향으로의 속도 성분은 줄어들고 벽면에 수직인 방향으로의 속도는 증가하게 되는 경향을 나타내었다. 이는 충돌 후 벽면 근처에 분포하는 액적이 속도가 빠른 뒤따르는 액적에 의해 벽면 위쪽으로 밀리게 되는 현상이 분위기 압력, 혹은 분위기 밀도가 클 수록 두드러지기 때문이다. 분위기 밀도가 높아질 수록 분무의 진행은 작아지게 되고 그 결과 정체 분무가 벽면 주위에 많이 형성되고 벽 근처의 분무 끝부분에서부터 위쪽으로 말려올라가는 vortex가 형성된다.

Fig. 3은 case2, 분사후 0.8 ms일때의 분무 모

양과 속도장을 실험 결과와 비교한 것으로 실험 결과에 비하여 분무 진행 거리가 작게 예측되는 경향을 보였다. 이는 연료 분사 과정에서 처음부터 일정한 크기 분포를 갖는 입자를 생성하는 방법으로 모사함으로써, 연료 분사 초기에 분무 입자에 작용하는 항력이 실제보다 크게 계산되었기 때문으로 볼 수 있다.

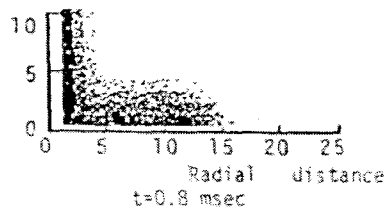
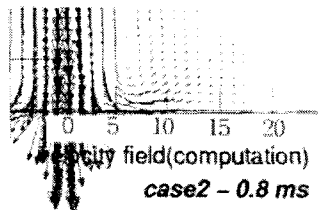
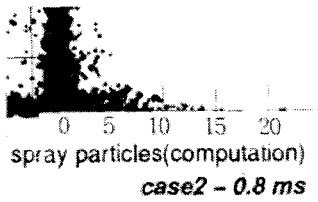


Fig. 3 Spray particles, Velocity field, and reconstructed image<sup>(1)</sup> for impinging spray (case2, 0.8 ms after start of injection)

Fig. 4는 충돌 벽면에 나란한 방향으로의 시간에 따른 진행 거리를 실험 결과와 비교한 결과로, 앞에서 언급한 바와 같이 계산에 의한 진행 거리가 실험값보다 작게 예측되었음을 알 수 있다. 분무의 벽충돌 시기와 충돌 후 진행 거리를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 분무 미립화 모델 개발과의 연결 및 검증 작업이 요구되며, 관련 연구를 수행 중이다. 또한 분무의 진행 거리는 분무 진행방향으로의 격자 크기 의존도가 높으므로 실험 결과와 약간의 차이를 보였으나,

분위기 압력의 변화에 따른 벽근처에서의 분무 성장 경향과 분무 높이는 실험 결과와 대체적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

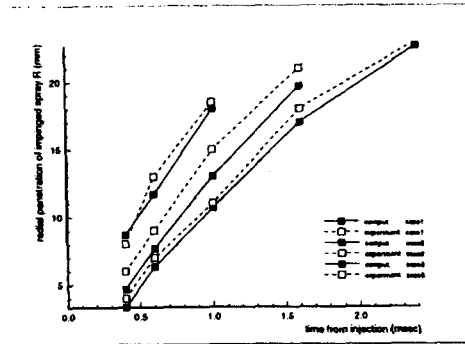


Fig. 4 Radial penetration of impinging spray compared with experiment

#### 4. 2 기울어진 벽면 충돌 분무

기울어진 벽면에 충돌하는 분무에 대하여 충돌 분무와 벽면이 이루는 각도의 영향을 알아보기 위하여 Fujimoto et al.<sup>(2)</sup>의 실험 결과와 비교 검증 계산을 수행하였다. 계산 조건은 Table 2에 나타낸 바와 같고 수직 충돌 검증 계산에서와 동일한 계산 격자를 사용하였다.

Table 2 Test conditions of impinging spray (inclined impingement)

	case1	case2	case3
평균 분사압(MPa)	13.8	13.8	13.8
분사 시간(ms)	1.30	1.30	1.30
분사량(mm <sup>3</sup> )	8.2	8.2	8.2
분위기 압력(MPa)	1.5air	1.5air	1.5air
충돌 각도(deg.)	0	15	45
충돌 거리(mm)	24	24	24
분사 노즐	직경(mm) 0.2		
	분위기 온도(K) room temperature		

벽면이 기울어져 있는 경우에는 수직 충돌의 경우와는 달리 분무 진행 방향으로 치우쳐진 비대칭 모양의 분무가 발달하게 되는데 계산 결과 또한 이러한 경향을 잘 나타내었다.

Fig. 5는 0도(수직 충돌), 15도, 45도로 기울어진 벽면에 충돌하는 분무 계산 결과를 시간에 따라 나타낸 것으로, 수직 충돌과 45도 기울어진 벽면 충돌의 경우 계산 결과 아래 등밀도선으로 표시된 실험 결과와 비교하여 분무 모양과 진행 거리에 대하여 타당한 결과를 얻었다.

## 5. 결론

내연 기관 내의 연료 분무와 연소실 벽면의 충돌 현상을 해석하기 위하여 벽면에 충돌하는 분무의 미립화를 수치적으로 모사할 수 있는 모델을 수립하고, 이를 3차원 해석 코드인 KIVA-POSTECH에 적용하였다.

본 연구에서 제안한 충돌 모델은 벽면의 온도와 분무의 입계 온도와의 관계에 따라 변하는 분무의 거동을 모사할 수 있도록 하였으며 저온 벽면에 충돌하는 분무에 의한 벽면 액막 형성을 고려하였다. 계산 결과를 디젤 연료 분무에 대하여 수직 및 기울어진 벽면에서의 충돌 실험 결과와 비교하여 정성적으로 타당한 결과를 얻었다.

본 연구에서 수행한 검증 계산의 경우에는 벽면의 온도가 고압(0.75 MPa - 1.5 MPa)에서의 연료 분무의 입계 온도(약 700K)보다 훨씬 낮으므로 cold wall model만이 사용된 결과를 보였으나 연소실 벽면이 상대적으로 높은 고부하 상태에서는 hot wall을 가정할 수 있으므로 고온 벽면에 대한 충돌 실험 결과의 확보 및 검증 작업이 요구된다.

실제 운전중인 내연 기관의 연소실에서 일어날 수 있는 모든 벽충돌 현상에 대하여 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 다양한 온도 조건에서 실험 결과와의 비교 검증을 통한 모델의 개선이 필요하다고 판단된다. 또한 연료 분무의 증발을 등과 같이 실제적으로 유용한 결과를 예측하기 위해서는 벽충돌 현상과 관련된 벽면 열전달 모델의 개발이 요구된다.

## 참고 문헌

1. N. Katsura, M. Saito, J. Senda, and H. Fujimoto, "Characteristics of a diesel spray impinging on a flat wall", SAE 890264, 1989
2. H. Fujimoto, J. Senda, M. Nagae, A. Hashimoto, M. Saito, and N. Katsura, "Characteristics of a diesel spray impinging on a flat wall", COMODIA vol.90, 1990
3. J. Senda, Y. Fukami, Y. Tanabe, and H. Fujimoto, "Visualization of evaporative diesel spray impinging upon wall surface by exciplex fluorescence method", SAE 920578, 1992
4. J. D. Naber and P. V. Farrell, "Hydrodynamics of droplet impingement on a heated surface", SAE 930919, 1993
5. J. D. Naber and R. D. Reitz, "Modeling engine spray/wall impingement", SAE 880107, 1988
6. Amsden, A. A., O'Rourke, P. J., and Butler, T. D., "KIVA-II : a computer program for chemically reactive flows with sprays", LA-11560-MS, 1989
7. Naber, J. D. et al., "Fuel impingement in a direct injection diesel engine", SAE 881316, 1988
8. C. Bai and A. D. Gosman, Development of methodology for spray impingement simulation, SAE 950283, 1995
9. J. Senda, T. Kanda, M. Al-Roub, P. V. Farrell, T. Fukami and H. Fujimoto, "Modeling Spray impingement considering fuel film formation on the wall", SAE 970047, 1997
10. Hirt, C. W., Amsden, A. A., and Cook, J. L., "an Arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds", J. Comput. Phys., 14, 227, 1974

11. P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, "The TAB method for numerical calculation of spray drop breakup", SAE 872089, 1987
12. P. J. O'Rourke, "Collective drop effects in vaporizing liquid sprays". Ph. D. thesis, Princeton Univ., 1981
13. C. Mundo, M. Sommerfeld, and C. Tropea, "Experimental Studies of the deposition and splashing of small liquid droplets impinging on a flat surface", ICLASS-95, pp. 134-141, 1995
14. Chr. Mundo, M. Sommerfeld and C. Tropea. "Droplet-wall collisions experimental studies of deformation and breakup process", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 21, No. 2, pp. 151-173, 1995
15. Watkins, A. P., and Park, K., "Assessment and application of a new spray wall impaction model", IMechE, 1996
16. Wachters, L. H., and Westerling, N. A. J., "The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state", Chem. Engng. Sci., 21, 1047-1056, 1966



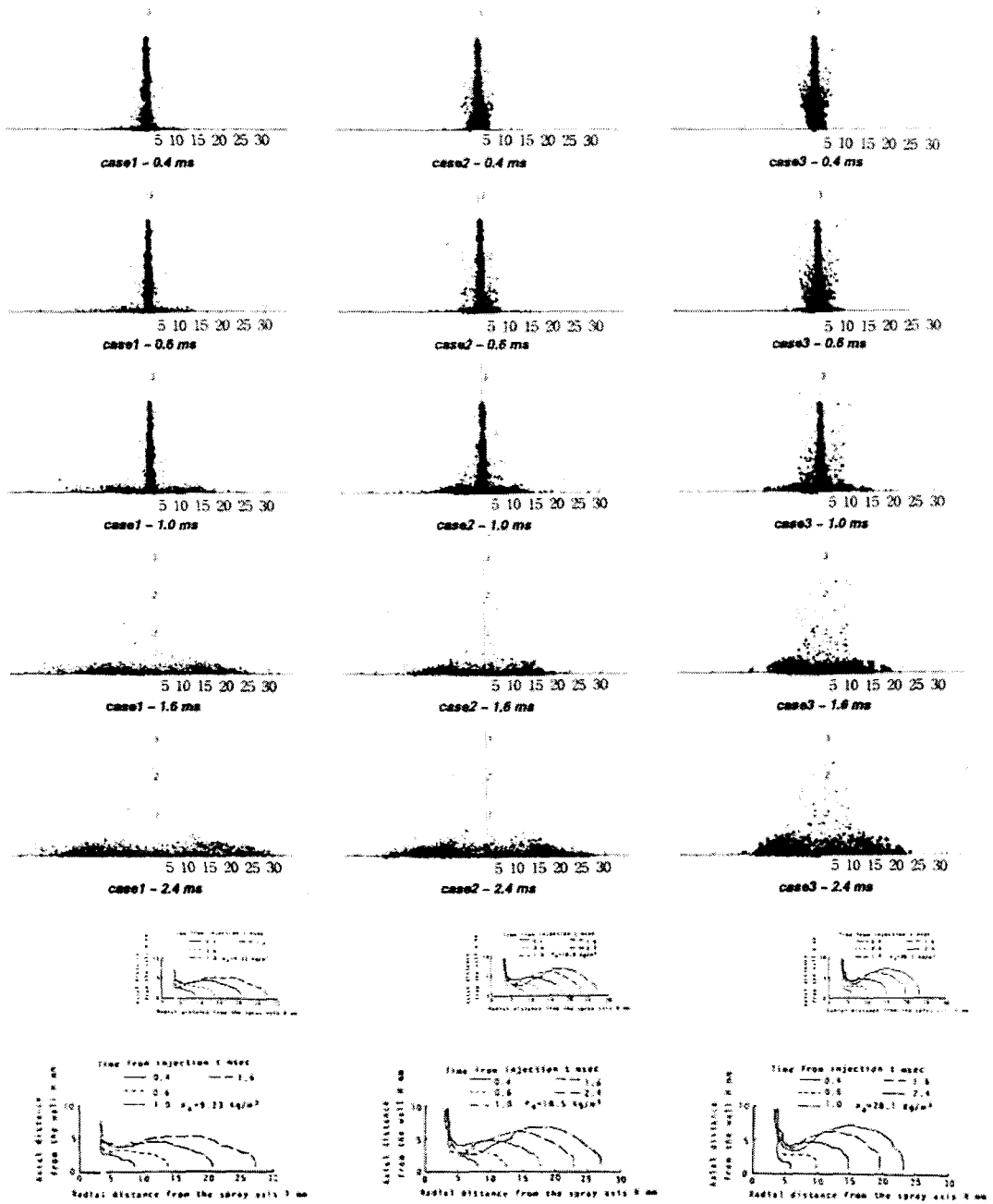


Fig. 2 Normal impinging spray compared with experiment

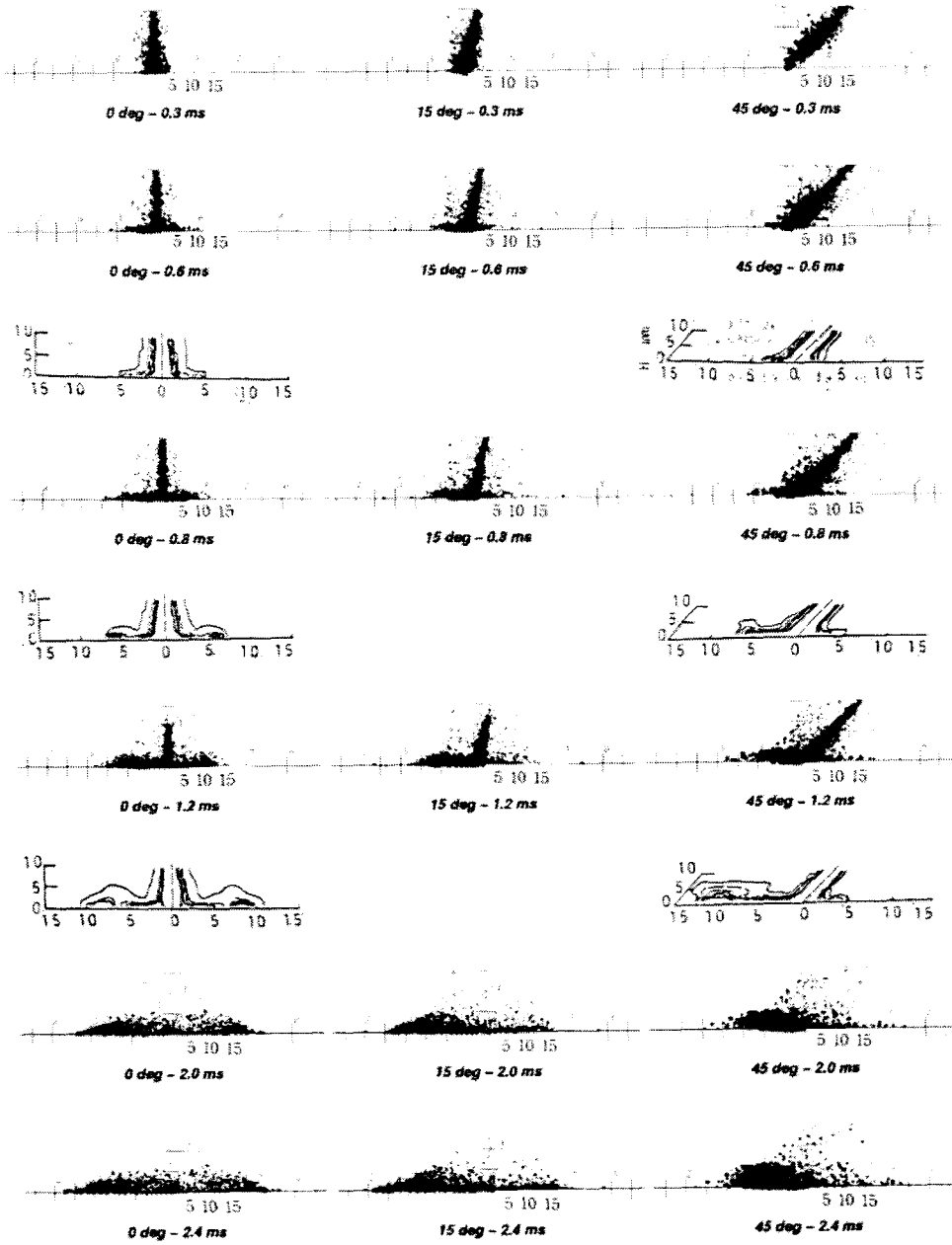


Fig. 5 Inclined impinging spray compared with experiment