

벽면분무충돌모델의 개발과 평가

Development and Assessment of Wall Spray Impaction Model

박 권 하¹⁾

K. Park

A new wall impaction model for spray and its assessment are described in this paper. The gas phase is modelled in terms of the Eulerian continuum conservation equations of mass, momentum, energy and fuel vapour fraction. The liquid phase is modelled following the discrete droplet model approach. The droplet parcel contains many thousands of drops assumed to have the same size, temperature and velocity components. The droplet parcel equations of trajectory, momentum, mass and energy are written in Lagrangian form. The new drop-wall interaction model is proposed, which is based on experimental investigations on individual drops, and it is applied for the general non-orthogonal grid. The model is then assessed through comparison with experiments over a wide range of test conditions of sprays. The results are in good agreement with experimental data.

1. 서 론

연료의 경제성이 우수한 디젤기관은 최근 들어 유럽을 중심으로 소형승용차에 적용이 늘고 있다, 즉 디젤기관이 소형고속화되고 있다. 이러한 엔진에서는 분사된 연료가 피스톤 벽면에 부딪쳐서 쌓이게 됨으로 연료 및 증발연료가 벽면부근에만 분포하게 되며 주위공기와 잘 섞이지 못하고 연소기간후에도 미연가스로 배출되게 된다. 최근 이러한 현상을 방지하기 위한 적극적인 방법으로 분사연료의 벽면충돌을 이용하는 연소실시스템이 제시되고 있으며, 벽면충돌모델을 적용하여 최적형상을 찾는 연구가 증가하고 있다.

Naber and Reitz[1]는 Stick모델을 개선한 Reflect모델과 Jet모델을 제시하였다. Stick모델에서는 액적이 벽면에 충돌하면 그 충돌점에 부착하여 증발하게 된다. Reflect모델에서는 벽면에 충돌된 액적이 에너지의 손실 없이 충돌전의 크기와 속력을 가지고 튀어 오르게 되며, Jet모델에서는 접근한 액적이 튀어오르지않고 충돌면과 평행한 방향으로 튀어 나가게 되는데 역시 충돌에 의한 에너지 손실 없이 충돌전과 동일한 크기와 속력을 갖는다. 그들에 의하면 Jet모델이 가장 잘 맞는 것으로 보고되었다. Naber et al[2]은 피스톤보울내에 마련된 충돌부에 분사되는 경우에 대하여 Jet모델을 적용하였다. 충돌후 액적들이 너무 멀리퍼져나감을 알았고, 따라서 Jet모델을 개선하여 새로운 모델을 제시하였다. 그러나 아직도 벽면충돌직후 액적들의 분포가 실험치에 비하여 훨씬 멀리 퍼지고 있다.

다른 모델들(Shih and Assanis[3], Reitz and Rutland[4], Wakisaka et al[5])도 Jet모델을 변형 개선하고 있는데, 역시 충돌후에도 운동에너지가 보존되는 것으로 가정하고 있으며 대부분의 경우 실험결과에 비하여 충돌액적들이 너무 멀리 퍼져나감을 보여주고 있다. 이는 충돌에 의한 에너지 저감을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

Watkins and Wang[6]은 웨버넘버에 기본을 두고 있는 충돌모델을 제시하였다. 이 모델에서는 충돌후 액적의 속력을 계산하기 위하여 실험에 근거한 에너지 손실계수를 도입하고 있다. 웨버넘버가 높은 경우에는 충돌면과 수직방향으로 접근하는 액적의 운동에너지가 전부 소실되는 것으로 가정하였으며, 즉 Stick모델과 동일한 특성을 갖는다. 결과적으로 고속의 충돌에서는 액적의 퍼짐이 둔화되고 실험치와 비교할 때 현저히 적게 퍼지는 문제점을 보여주었다. 따라서 그들[7]은 O'Rourke and Bracco[8]에 의하여 제시된 액적간의 충돌모델을 개선하여, 충돌후 액적의 진행방향에 액적밀도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 향하도록 하였다. 결과적으로 충돌후 액적들이 충돌면

1) 한국기계연구원 (305-600, 대전시 유성구 장동 171, Tel: 042-868-7359)

위로 퍼지는 것을 충분히 개선하였다. 하지만 충돌면과 평행한 방향으로의 퍼짐은 오히려 저하되는 결과를 가져왔다.

이 논문에서는 Watkins and Wang[6]모델에서와 같이 개별액적의 실험치에 기본을 둔 새로운 벽면충돌모델을 제시하며, 그 결과들을 여러 가지 조건의 실험치와 비교한다.

2. 수학적모델

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 연료증발방정식이 Eulerian형으로 주어지며, 고압축성유동에 대한 $k-\epsilon$ 모델이 적용된다. 액상의 유동에 대하여는 움직이는 격자, 운동량, 질량 및 에너지방정식은 Lagrangian형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도 등 특성이 동일한 수천개의 액적으로 이루어졌다고 가정한다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력쌍의 해석은 PISO 알고리즘을 사용하였다.

일반좌표계(ξ^i)로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반텐서표시법과 함께 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho U^i\Phi - \frac{\theta\Gamma_\phi q_{ij}}{\sqrt{g}} \frac{\partial\Phi}{\partial t}) = \theta S_\phi + S_\phi^d \quad (1)$$

격자면의 수직유동항 U^i 는 다음과 같다.

$$U^i = P_{ij}u^j \quad (2)$$

여기에서 u^j 는 속도벡터 \bar{V} 의 직교좌표성분이며, P_{ij} 는 면적벡터의 직교좌표성분으로 다음과 같이 주어진다.

$$P_{ij} = \sqrt{g} \frac{\partial\xi^i}{\partial x^j} \quad (3)$$

그리고 Jacobian Determinant $\sqrt{g} = |J|$ 은

$$\sqrt{g} = \det(J^i_j) \quad (4)$$

과 같으며, 이는 관련점의 체적요소와 관계되며, 만일 $\Delta\xi^i = 1$ 이면, \sqrt{g} 은 셀의 체적이 된다.

기하학적관계량인 q_{ij} 은 다음과 같이 정의된다.

$$q_{ij} = \bar{A}^i \cdot \bar{A}^j \quad (5)$$

여기에서 \bar{A}^i 은 콘트론티볼륨의 한 표면에 수직인 면적벡터이다.

일반좌표계로 변형된 방정식은 유한체적법에 의하여 해석된다. 시간의 함수인 과도항은 Euler implicit방법을 사용하였고, 대류항과 발산항에 대하여는 Hybrid upwind/central difference scheme을 사용하였다.

3. 벽면충돌모델

새로운 벽면충돌모델은 개별액적의 실험결과(Araki and Moriyama[9], Jayaraine and Mason[10], Wachters and Westerling[11])에 기본을 두고 있다. 이들 실험은 충돌후 액적이 충돌면과 수직방향과 수평방향으로 나뉘어 거동됨을 보여주고 있으며, 역시 충돌전 액적의 웨버넘버에 의존함을 보여준다.

Wachters and Westerling[11]은 Fig. 1과 같이 액적의 벽면충돌에 의한 변형특성을 설명하고 있다. 액적은 충돌전 거의 구형을 하고 있다. 충돌직후 크게 변형되는데 등근지붕주위로 연속적인 유막을 형성하면서 퍼져 나간다. 끝까지 퍼져 나간 액적은 웨버넘버가 작은 경우 다시 하나의 액적으로 뭉쳐서 튀어올라가며, 웨버넘버가 큰경우 여러개의 작은 액적들로 부서지며 부분적으로 뭉쳐서 튀어올라가거나 벽면에 유막을 계속형성함을 보여준다.

Rebound모델인 웨버넘버가 적은 $We < 80$ 인 경우에는 Wang and Watkins[7]의 모델과 매우 유사하지만, 충돌에 의한 에너지소실량을 Wachters and Westerling[11]에 의해 제시된 Fig. 2와

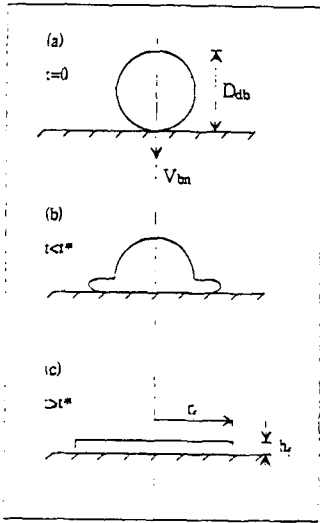


Fig. 1 Deformation of impacting drop

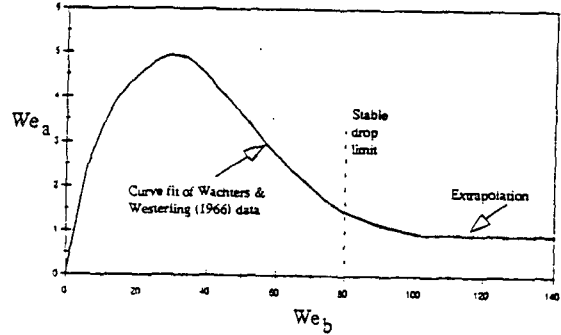


Fig. 2 Relationship between Weber numbers

같은 실험결과를 이용하고 있다. 충돌하는 액적의 웨버넘버(We_b)를 계산하고 그래프로부터 충돌 후 액적의 웨버넘버(We_a)를 얻는다. 충돌전후에 액적의 크기가 변화하지 않기 때문에, $We_a/We_b = (v_{an}/v_{bn})^2$ 이 되며, 충돌후 액적의 수직방향성분은 다음과 같이 주어진다.

$$v_{an} = -\sqrt{\frac{We_a}{We_b}} v_{bn} \quad (6)$$

Wachters and Westerling[11]에 따르면 충돌면에 수평방향성분은 충돌에 영향을 받지 않는다. 따라서,

$$v_{at} = v_{bt} \quad (7)$$

그리고 액적의 크기는 충돌전과 동일하다.

$$D_{da} = D_{db} \quad (8)$$

Break-up모델인 웨버넘버가 큰 영역 $We > 80$ 인 경우에는 현재까지 제시된 어떤 모델과도 다르며, Wachters and Westerling에 의해 제시된 충돌중의 액적변형특성에 근거하여 형성하였다. Fig. 1(a)은 $t=0$ 에서 수직속도 v_{bn} 으로 표면에 충돌하는 액적을 보여준다. Fig. 1(b)에서 보여주는 것처럼 액적의 등근지붕이 사라지기까지 액적의 속도는 일정하게 유지된다. Stow and Hadfield[12]의 실험에서도 위에 기술된 현상과 동일한 결과를 보여준다. 이러한 현상에 기본을 두고 개발하였으며, 충돌후 부서진 액적의 크기를 결정하기 위하여, Naber and Farrell[13]에 의하여 주어진 값을 이용한다. 이상의 방정식들을 종합하면, 충돌모델은 다음과 같이 요약된다.

$We < 80$ 인 경우;

$$v_{an} = -\sigma v_{bn} \quad (9)$$

$$v_{at} = v_{bt} \quad (10)$$

$$D_{da} = D_{db} \quad (11)$$

$We > 80$ 인 경우;

$$v_{an} = -R_{xx} \left(\frac{\sigma We_a}{\rho D_{da}} \right)^{0.5} \quad (12)$$

$$v_{at} = v_{bt} \pm R_{xx} v_f \quad (13)$$

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^{1/3}} \quad (14)$$

4. 충돌모델의 적용

새로운 모델을 시험하기 위하여, Table 1에 보여주는 것처럼 여러 조건의 분무거리, 분무조건 및 주위공기조건에 적용한다.

Table 1 Test Cases

Test cases	1	2	3	4	5	6	7	8	9/10/11
Wall dist (mm)	24	24	24	24	24	24	24	25	6.34
Trap pres (MPa)	1.0	1.5	1.5	2.5	2.9	1.5	1.5	2.9	3.2
Trap temp (K)	room	room	room	700	773	room	room	773	760
Inj pres (MPa)	14.0	14.0	13.8	16.4	19.6	13.8	13.8	19.6	83/91/116
Nozzle dia (mm)	0.3	0.3	0.3	0.2	0.25	0.3	0.3	0.25	0.406
Inj. durat (ms)	1.2	1.2	1.4	1.8	2.4	1.4	1.4	2.4	1.0-2.75
Inj. angle (°)	0	0	0	0	0	15	30	15	0

이 조건들은 세 가지 범주로 나뉘어 지는데, 벽면에 수직충돌(Case 1-5), 벽면과 비스듬하게 충돌하는 각충돌(Case 6-8) 그리고 분사기에 매우 가까이 위치한 면에 고속충돌하는 경우(Case 9-11)로 구분된다. 모든 경우에 대하여, Watkins and Wang에 의하여 제시된 변형된 액적사이의 충돌모델을 추가 혹은 추가하지 않은, 새모델을 적용한 계산결과들(New/New+Col)은 실험치 및 다른 모델의 결과치와 비교된다.

수직충돌의 경우에 대하여는 35X35격자를 이용하며, 각충돌의 경우는 40X10X20의 격자를 사용한다(Fig. 3). 격자의 배열은 액적이 집중되는 분무주변과 충돌표면에 밀도가 높게 하였다. 또한 액적의 흐름을 따르는 격자를 설정함으로써 계산의 정도를 높이고 있다.

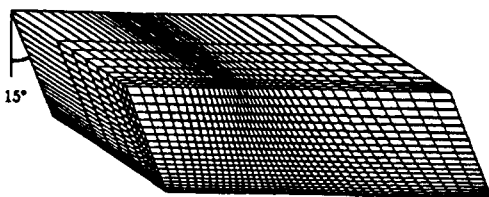


Fig. 3 Grids for angled impaction cases

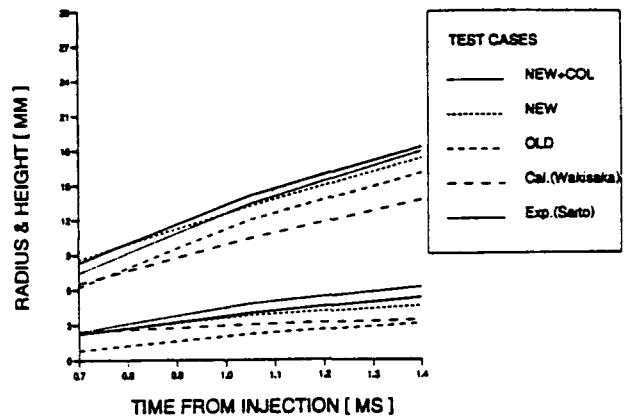


Fig. 4 Comparison of wall spray radius and height, Case 3

5. 결과 및 고찰

수직충돌의 경우에 대한 액적분포를 살펴보면, 3가지 충돌모델이 적용되었는데, 'New'모델, Watkins and Wang[6]에 의한 'Old' 그리고 새로운 Park's model과 Wang and Watkins[7]에서 제시된 액적간 충돌모델을 조합한 'New+Col'모델이다. 앞에 언급한 두 모델을 비교하면, Park's model에서는 액적들의 퍼짐이 Old모델에 비하여 훨씬 잘 진행됨을 보여준다. 특히 wall head vortex부분에 많은 액적들이 분포함을 알 수 있다. New+Col모델은 New모델과 비교할때, 장단점을 갖는다. 충돌후 액적들이 충분히 높이 퍼져올라가지만 실험에서 볼 수 없는 분무본체로 부터

멀리 떨어져 분포하는 액적들이 많다.

충돌분무반경과 높이의 시간에 따른 진행거리에 대하여는, Case 1의 경우 New모델에 의한 결과가 실험값보다 약간 적지만 Old모델에 의한 결과보다 월등함을 알 수 있다. 특히 높이 방향의 경우 Old모델의 경우 실험치의 반정도에 머무르지만 New모델의 경우 실험치와 거의 유사함을 보여준다. 한편 새로운 모델에 Wang에 의하여 개선된 액적사이의 충돌모델을 추가한 경우 높이 방향의 값이 실험치보다 높게 예측되었다. Case 3에 대한 충돌분무의 퍼짐정도는 역시 New모델의 경우가 다른 경우와 비교할 때 훨씬 좋은 것을 알 수 있다. 반경방향과 높이방향에서 모두 실험치와 거의 유사함을 보여준다. 하지만 Wakisaka에 의한 결과는 실험치보다 적게 예측되고 있고 특히 반경방향에서는 Old모델보다 낮은 값을 보여준다.(Fig. 4)

경사면에 부딪히는 경우인 Case6-8에 있어서도 New모델이 아직 다른 모델에 비하여 우수하지만 수직충돌인 Case 3보다는 서로간의 차이가 적은 것을 알 수 있다. 이는 각을 가지고 충돌하면서 수직충돌속도의 감소로 v_r 의 효과가 줄어들었기 때문으로 생각된다. Fig. 5는 Case 8인 경우의 액적분포를 보여준다. 사진과 매우 유사함을 알 수 있다.

마지막 3가지 경우인 Case 9-11은 분무기가 충돌면에 매우 가까이 위치하고 있으며 고속분사되는 경우이다. 충돌면이 매우 작기 때문에 충돌한 액적들이 짧은 시간내에 충돌면을 떠나게 되고 따라서 충돌모델들간의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 개선된 액적간의 충돌모델은 충돌면을 떠난후에도 계속 작용하기 때문에 액적들이 크게모여들거나 더욱 작아져서 증발되어 버린다.

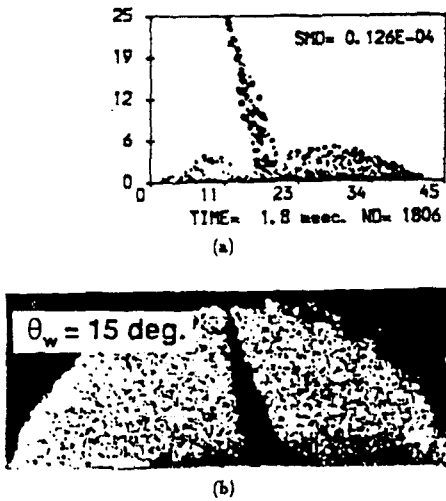


Fig. 5 Comparison of wall spray, Case 8
 (a) New model
 (b) Photograph(Senda et al[14])

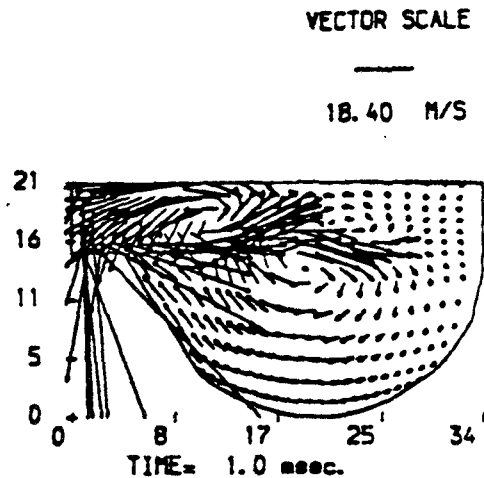


Fig. 6 Gas velocity distribution, Case 9

모든 모델의 경우 구불거리는 거동을 하면서 진행하게 되는데 이는 역시 Fig. 6의 속도장에서도 보여주고 있다.

6. 결론

상기의 고찰을 종합하여 보면 층돌모델의 특성은 다음과 같다.

▶ Old모델은 모든 경우에 있어서 액적들이 충분히 퍼져 나가지 못한다.

▶ 대부분의 분무조건에서 새로운 모델(New model)을 적용하여 계산한 결과가 다른 모델에 의한 결과보다 우수하며, 실험결과와도 유사하게 분포함을 보여준다.

▶ 새로운 모델에 개선된 액적간 층돌모델을 추가할 경우(New+Col) 반경방향의 퍼짐은 개선됨을 알 수 있으나 높이방향의 결과는 일반적으로 실험치 보다 높게 예상되고 있다.

▶ 액적의 층돌에 의한 운동에너지소실을 고려하지 않은 Reflect모델, Jet모델 및 개선된 여러 형태의 Jet모델에 의한 예측결과와 비교할 때 새로운 층돌모델이 월등함을 보여준다.

참고문헌

[1] Naber, J.D. and Reitz, R.D., "Modelling engine spray/wall impingement", SAE 880107 (1988).

[2] Naber, J.D., Enright, B. and Farrell, D., "Fuel impingement in a direct injection diesel engine", SAE Paper 881316 (1988).

[3] Shih, L.K. and Assanis, D.N., "Implementation of a fuel spray wall interaction model in KIVA-II", SAE Paper 911787 (1991).

[4] Reitz, R.D. and Rutland, C.J., "3-D modelling of diesel engine intake flow, combustion and emissions", SAE Paper 911789 (1991).

[5] Wakisaka, T., Yoshida, S.K., Isshiki, Y. and Shimamoto, Y., "A study on spray models for numerically analysing fuel spray behaviour", Proc. 11th Symp. on Internal Combustion Engines, JSME/JSAE (1993), p.241.

[6] Watkins, A.P. and Wang, D.M., "A new model for diesel spray impaction on walls and comparison with experiment", Proc. COMODIA 90 Int. Symp. on Diagnostics and Modelling of Combustion in I.C. Engines, Kyoto (1990), p.243.

[7] Wang, D.M. and Watkins, A.P., "Numerical modelling of diesel wall spray phenomena", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol.14 (1993), p.301.

[8] O'Rourke, P.J. and Bracco, F.V., "Modelling of drop interactions in thick sprays and a comparison with experiment", Stratified Charge Automotive Engine Conf. IMechE (1980).

[9] Araki, K. and Moriyama, A., "Deformation behaviour of a liquid droplet impinging on a hot metal surface", In Int. Cont. on Liquid Atomization and Spraying Systems ICLASS-82 (1982).

[10] Jayaratne, O.W. and Mason, B.T., "The coalescence and bouncing of water drop at air/water interface", Proc. R. Soc. Lond-A 280 (1964), p.545.

[11] Wachters, L.H.J. and Westerling, N.A.J. "The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state", Chemical Engineering Science, 21 (1966), p.1047.

[12] Stow, C.D. and Hadfield, M.G., "An experimental investigation of fluid flow resulting from the impact of a water drop with an unyielding dry surface", Proc. R. Soc. Lond. A, 373 (1981), p.419.

[13] Naber, J.D. and Farrell, P., "Hydrodynamics of droplet impingement on a heated surface", SAE Paper 930919 (1993).

[14] Senda, J., Fukami, Y., Tanabe, Y. and Fujimoto, H., "Visualization of evaporative diesel spray impinging upon wall surface by exciplex fluorescence method", SAE 920578 (1992).