

확장 충돌 모델이 분무계산에 미치는 영향

한진희* · 조상무* · 박권하*

The Effect of Extended Collision Model on a Spray

J-H Han* · S-M Jo* · K-H Park*

Key words : Spray(분무), Spray Density(분무밀도), Spray Model(분무모델), High Pressure Injection(고압분무)

Abstract

Spray calculation has been studied to understand the behavior of the spray in a combustion chamber. But the spray dispersion has not been predicted properly in a high velocity injection spray or a wall impaction spray. In this study the extended grazing collision model is applied to improve the problem.

The gas phase is modelled by the Eulerian continuum conservation equations of mass, momentum, energy and fuel vapour fraction. The liquid phase is modelled following the discrete droplet model approach in Lagrangian form.

The droplet distributions, penetration, width and gas flows are compared for the cases with or without extended model. The extended collision model makes the results better.

기 호 설 명

U^i : normal flux component
 u^i : cartesian components of a velocity vector
 g : Jacobian determinant
 P_{ij} : cartesian components of the area vector
 q_{ij} : geometric relations
 q : void fraction
 D : diffusivity
 Sh : Sherwood number
 D_d : droplet diameter

T_m : mean temperature

V_d : droplet velocity

1. 서 론

디젤 기관의 설계에서 분무 특성은 중요한 요소로 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 최근의 지구온난화와 에너지 절약을 위한 동력원으로 고압 분사 시스템을 장치한 고효율 디젤기관이 적극 개발됨에 따라 고압 분무에 대한 적절한 해석은 더욱 중요시되고 있다.

* 한국해양대학교 기계공학부

자유분무에 관해서는 분무 선단 진행거리, 폭 및 평균 액적 직경에 대한 실험적/계산적 고찰이 많이 수행되고 있으며, 초기의 연구로써 Tishkoff 등⁽¹¹⁾은 1.8m 길이의 매우 큰 공간에서 분무의 거동을 관찰했는데, 분사 압력의 증가와 함께 분무 길이의 증가와 분무 폭의 감소를 보고하고 있다. 그후 분무 구조에 대한 상세한 연구들(Kuniyoshi 등⁽¹²⁾, Elkotb 등⁽¹³⁾)이 진행되었고, 분사 직후의 main jet 영역과 혼합영역으로 구분하여 그 특성을 실험적으로 분석하고 있다.

분무 구조에 대한 좀더 체계적인 정보를 얻기 위하여 수치계산에 의한 연구들이 진행되었으며 Faeth⁽⁴⁾에 의하면 크게 두 가지 부류로 나뉜다. 첫 번째는 LHF(Locally Homogeneous Flow) 모델로 불리는 단상유동으로 해석하는 것이며 두 번째는 gas와 액체의 유동을 분리하여 해석하는 것으로 CFM, CDM 그리고 DDM(Discrete Droplet Model)이 있다. LHF 모델은 분무성장의 과도한 결과를 보여주며, DDM 모델의 경우에는 초기 분무 조건의 결정에 어려움이 있었다. DDM 모델은 El Wakil 등⁽⁵⁾에 의하여 처음으로 적용된 이후 Borman과 Johnson⁽⁶⁾, Crowe^{(7),(8)} 등이 항공기용 연소기의 분사 특성을 분석하기 위하여 사용하였다. Gosman과 Johns⁽⁹⁾, Beshay 등⁽¹⁰⁾ 및 Khaleghi 등⁽¹¹⁾은 디젤기관 적용을 위하여 DDM 모델을 이용한 분무 계산을 수행하였다. 분무의 진행 거리에는 만족할 만한 계산결과를 보여 주었지만, 분무 폭에 대하여는 미흡한 결과를 보여주고 있는데, 이는 분사 압력의 증가와 함께 심화되고 있다.

충돌 분무 역시 디젤기관 해석에 중요한 부분을 차지하고 있으며, 많은 모델들이 개발되고 있다. 기존의 KIVA 코드는 충돌한 액적이 충돌면에 부착한다고 가정함으로써 액적들의 벽면 충돌후 거동을 해석하기엔 부적합하였다. Naver와 Reitz⁽¹²⁾는 충돌후 액적이 충돌면에 부착되는 것으로 가정된 Stick모델의 정체성을 보완하여 Reflect모델과 Jet모델을 제안하고 이를 기관에 적용⁽¹³⁾하였다. 그들의 계산결과는 Jet모델이 가장 적절하다는 결론을 제시하였지만, 포화온도 이하에서만 고려하였고, 웨버수에만 의존하여 수평방향으로 실제 분무 거동을 크게 초월하였으며, 액적들이 충돌면에 집

중되는 현상을 보여주고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Shih와 Assanis⁽¹⁴⁾, Reitz와 Rutland⁽¹⁵⁾와 Wakisaka 등⁽¹⁶⁾은 Jet모델을 수정한 새로운 모델들을 발표하였는데, 이들 모델은 액적의 크기와 온도(Weber, Nusselt 수에 기본)를 고려하였다. 특히 액적의 온도는 연소실벽면 온도가 액적의 포화온도보다 클때와 작을때로 나누어 고려하여 실제 많은 향상을 가져왔지만, 분무 충돌시의 에너지 손실을 고려하지 않아서 발생하는 액적의 과도한 퍼짐을 피할 수는 없었다. Watkins와 Wang⁽¹⁷⁾은 이러한 문제점을 보완하기 위하여 액적이 벽면에 충돌할 때의 에너지 손실을 고려한 모델을 발표하였는데, 충돌 후 액적 거동을 충돌면과 수직/수평으로 구분하여 처리하였다. 수직방향은 충돌시 에너지 손실을 고려하여 튀어 오르는 액적의 속도를 계산하였고, 수평방향성분은 에너지 손실이 없는 것으로 생각하였다. 결과적으로 액적의 퍼짐이 실험과 비교하여 부족함을 보여주었는데, 특히 벽면과 수직방향으로는 많은 차이를 나타내었다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Wang과 Watkins⁽¹⁷⁾는 확장 충돌모델(Extended grazing collision model)을 그들의 모델에⁽¹⁶⁾ 추가하였는데, 벽면의 수직방향으로 많은 개선의 효과를 보여주었다. 하지만 수평방향으로는 더욱 좋지 못한 영향을 주었다. Park와 Watkins⁽¹⁸⁾는 액적이 벽면과 충돌할 때 충돌면에 유막을 형성하며 펼쳐지는데, 이때의 확장속도가 액적의 표면 장력을 능가하게 되면 작은 액적들로 분리되면서 튕겨 나가는 현상을 고려하여 모델링 하였다. 그들에 의하면 많은 경우 다른 모델과 비교하여 우수한 결과를 보여주고 있는데, 실험결과와 비교하여 수직방향의 퍼짐이 아직 부족함을 나타내었다.

본 연구에서는 충돌 분무의 퍼짐을 향상하기 위하여 도입된 분무 밀도를 고려한 확장 충돌 모델을 고압 자유분무 및 충돌분무에 적용하여 분무거동에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 수학적 모델

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 연료 증발방정식이 Eulerian형

으로 주어지며, 고압축성 유동에 대한 *k-ε* 모델이 적용된다. 액상의 유동에 대하여는 움직이는 격자, 운동량, 질량 및 에너지 방정식이 Lagrangian 형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도 등 모든 성질이 동일한 수천 개의 액적으로 이루어진다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단 응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력 쌍의 해석은 PISO 알고리즘을 사용하여 해석된다.

일반좌표계(ξⁱ)로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반텐서 표시법과 함께 표현된다.

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

여기에서 *U*ⁱ는 수직 유동항, *w*ⁱ는 속도벡터 ∇의 직교좌표 성분이며, *P*_{ij}는 면적벡터의 직교좌표 성분이다.

분무 액적의 벽면충돌모델은 Park과 Watkins⁽¹⁸⁾에 의한 모델로서 다음과 같이 요약된다.

We < 80인 경우;

$$v_{an} = -av_{bn} \quad (2)$$

$$v_{at} = v_{bt} \quad (3)$$

$$D_{da} = D_{db} \quad (4)$$

We > 80인 경우;

$$v_{an} = -R_{xx} \left(\frac{\sigma We_a}{\rho D_{da}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

$$v_{at} = v_{bt} \pm R_{xx} v_f \quad (6)$$

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^3} \quad (7)$$

확장 충돌 모델은 액적들의 밀집 정도를 고려한 것으로 내용을 요약하면 다음과 같다.

$$\alpha_n = (1 - \theta^p) p a$$

$$V_{dn} \cdot (V_d \times \nabla \theta) = 0 \quad (8)$$

$$|V_{dn}| = |V_d|$$

*V_d*는 액적의 속도이다. 그리고, 여기서 α_n, α는 각각 *V_d*와 ∇θ사이의 각이다.

3. 계산 조건

3.1 자유분무 계산

본 계산은 분무 및 유동특성을 실험적으로 분석한 Lim 등⁽¹⁹⁾의 실험조건을 기준으로 한다. 분사 압력의 효과를 비교 분석하기 위하여 15MPa에서 150MPa까지를 계산조건으로 선정하였다. 분무

Table1 Test cases in free spray cases

	15MPa	50MPa	100MPa	150MPa
Inj. press(MPa)	15	50	100	150
Nozzle hole dia.(mm)	0.22	0.22	0.22	0.22
Gas press.(MPa)	0.87	0.87	0.87	0.87
Gas temp.(K)	room	room	room	room
Wall Dist.(mm)	100	100	100	100

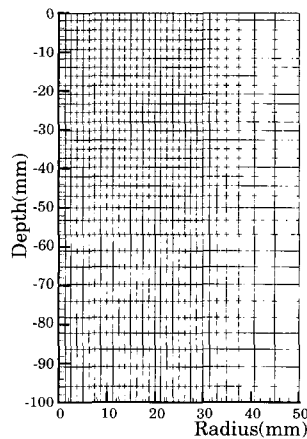


Fig. 1 Calculation grids in free spray cases

액적들의 밀도가 높은 분무축 부근의 격자를 조밀하게 구성하였으며, 모든 분사 압력의 경우에 대하여 모델 적용의 영향을 같게 하기 위하여 동일한 격자를 적용하였다.

계산 조건은 Table1과 같이 주어지며, 계산 격자는 Fig.1과 같다.

3.2 충돌분무 계산

연료 충돌분무 거동을 예측하는데 있어서 확장 충돌 모델의 적절한 적용을 위하여 그리고 계산 격자의 효과를 제외하기 위하여 Table2와 같이 분사 압력, 주위공기 조건, 충돌면 위치가 다른 경우를 선택한다. 그리고 기준조건에서 사용한

Table2 Test cases in impaction cases

Test cases	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Wall distance(mm)	32	24	24	25
Trap pressure (MPa)	1.48	1.5	2.5	2.9
Trap temperature(K)	room	room	700	773
Inj. pressure (MPa)	21.0	14.0	14.0	19.6
Nozzle diameter (mm)	0.265	0.3	0.2	0.25

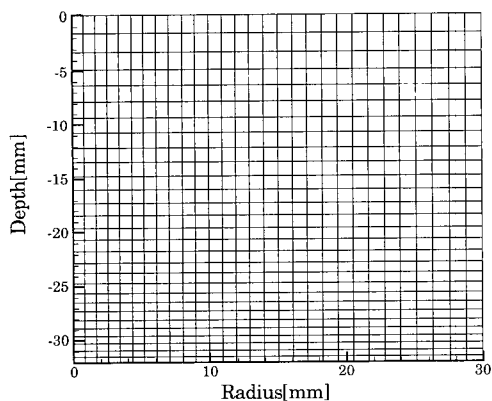


Fig. 2 Calculation grids in impaction cases

격자를 모든 경우에 동일하게 적용한다. 계산 격자는 Fig. 2와 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1 자유분무

분무 형상

Fig.3~6는 시간과 분사 압력 변화에 따른 액적분포의 변화를 나타낸 것으로 각각 분사 압력이 15, 50, 100, 150MPa에서 0.2ms 간격으로 배열되어 있다. 모든 경우 초기에 빠르게 분무가 성장하다가 후기로 갈수록 진행속도가 늦어지는 것을 볼 수 있다. 이는 초기의 분사압력으로 빠르게 진행되던 액적들이 정지되어 있는 주위 공기와의 상호작용에 의하여 거동이 둔화되는 것으로 판단된다. 압력이 가장 낮은 15MPa의 경우 분사액적이 바닥에 도달하는 시간이 가장 길고 액적의 분무밀도가 아주 높게 나타나고 있으며, 압력이 높아질수록 빠르게 바닥에 도달하고, 액적의 밀도는 작아지며, 액적도 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있다. 이는 압력이 커질수록 분사속도가 커지고, 이로 인해 주위 공기의 저항이 증대되어 액적들이 미립화되고 강한 와류로 인해 액적들이 주위로 넓게 퍼지는 것을 의미한다. 확장 충돌 모델의 추가로 인한 액적분무 형상은 저압일때 영향이 크지 않으나 고압으로 갈수록 반경 방향으로 넓게 퍼지고 분무 길이도 짧아지는 것을 볼 수 있다. 액적의 상대적인 밀도 차이를 고려하여 밀도가 높은 곳의 물질이 낮은 곳으로 이동한다는 확장 충돌 모델을 적용한 결과이다. 고압 일수록 속도장에 의한 영향이 커짐으로 인해 확장 충돌 모델의 영향이 상대적으로 더욱 커져서 액적들이 넓게 분포되는 것을 볼 수 있다. 분무선단의 모습이 확장 충돌 모델을 적용하지 않은 경우에는 뾰족한 반면, 확장모델을 적용한 경우는 분무 사진과 같이 버섯 모양으로 넓게 퍼지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 압력의 증가와 함께 확연히 나타나고 있다.

분무 진행거리

Fig. 7~11는 각 압력에 대한 확장 충돌 모델 을 적용했을 때, 적용하지 않았을 때, Lim⁽¹⁹⁾의 실험 결과와 비교한 것이다. 진행거리는 15MPa 일때 가장 느리며, 압력이 상승할수록 급속히 증가하다가 100MPa과 150MPa은 상대적으로 많은 변화가 없었다. Fig. 11의 각 압력의 실험치와 계산값에서 보는 것과 같이 일정한 고압 이상에서는 액적의 진행거리 성장이 지연 되고있다. 저압분무에서는 과도한 예측 결과를 보여주며, 확장 모델의 적용이 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있고, 고압이 될수록 확장 모델의 경우 실험 결과에 매우 접근함을 보여준다. 이는 확장 모델의 영향으로 분무선단의 퍼짐이 증가하면서 진행거리가 둔화된 것으로 판단된다.

분무 폭

Fig. 12~16는 분무 폭에 대한 결과 비교이다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 실험치와 계산값이 전반적으로 편차를 보이고 있다. 저압 영역에서는 실험과 계산값이 유사하게 보이나, 고압일수록 차이는 더 심해진다. 확장 충돌 모델을 적용하는 경우에 향상된 결과를 보여주고 있지만, 고압의 경우에는 아직 많은 차이를 보이고 있다. 실험에서는 강한 와류와 분사노즐 정밀도의 영향 때문에 편차가 고압으로 갈수록 심해지는 것으로 사료된다.

4.2 충돌 분무

분무 형상

Fig. 17, 18은 상온에서 실험한 Case 1과 2의 분사후 2.1, 2.0ms 일 때의 분무형상을 비교한 것으로 (a)는 Park과 Watkins⁽¹⁸⁾의 모델에만 적용한 경우이고, (b)는 Park의 모델⁽¹⁸⁾에 확장 충돌모델⁽¹⁷⁾을 벽면위 첫번째 셀에만 적용한 경우이며, (c)는 벽면위 첫번째 셀과 분무 중심셀에, (d)는 전체 영역에 확장 충돌모델을 적용한 경우이다. (e)는 각 경우의 실험결과를 보여준다. Park의 모델만을 적용한 (a)의 경우 충돌후 많은 액적들이 벽면에 주로 분포함으로써 벽면위로의 퍼짐이 부족하며, Fig. 18(a)에서 보여주는 것처럼 액적간 상호결합에 의한 매우 큰 액적들이 벽면에 나타

나는 것을 알 수 있다. 확장 충돌모델을 적용한 (b), (c) 및 (d)의 경우에는 (a)의 경우보다 많은 액적들이 벽면위로 분포됨을 보여주는데, 실험사진과 비교하여 볼때 (c), (d)의 경우는 분무선단에 비정상적인 분무 거동을 보여주고 있다. Fig. 19, 20은 고온 분위기인 700, 773K에서의 분무형태를 보여준다. 확장 충돌모델을 적용하지 않은 (a)의 경우에는 역시 분무 퍼짐의 정도가 부족함을 알 수 있다. (b), (c) 및 (d)는 (a)보다 분무 퍼짐이 월등함을 나타내는데, 서로 큰 차이는 없어 보인다. 액적의 분포 형태에서 살펴보면 상온 분위기에서의 분무 계산에서는 충돌면에만 확장 충돌모델을 적용한 (b)의 경우가 가장 적합한 것으로 판단되며, 고온 분위기의 경우에는 확장 충돌모델의 적용범위와는 크게 상관이 없음을 알 수 있다.

충돌 분무 진행거리

Fig. 21, 22는 상온에서 실험한 Case 1 과 2의 분사후 2.1, 2.0ms 일때의 충돌후 액적들이 충돌면과 수평방향으로 퍼져나가는 거리를 비교한 것이고, Fig. 23, 24는 고온의 분위기인 700, 773K에서의 비교이다. A는 Park과 Watkins⁽¹⁸⁾의 모델에만 적용한 경우이고, B는 Park의 모델⁽¹⁸⁾에 확장 충돌모델⁽¹⁷⁾을 벽면위 첫번째 셀에만 적용한 경우이며, C는 벽면위 첫번째 셀과 분무 중심셀에, D는 전체 영역에 확장 충돌모델을 적용한 경우이다. E는 각 경우의 실험결과를 보여준다.

상온의 분위기에서 충돌면이 멀리 떨어진 Case 1의 경우에는 Fig. 21에서 보여주는 것처럼 모든 경우에 대하여 실험 결과를 훨씬 미치지 못하는 예측결과를 보여주고 있는데, 이는 충돌 시점의 차이에 의한 오차로 판단된다. 상온의 경우인 Case 2에서는 전반적으로 낮은 예측결과를 보여 주는데, 확장 충돌모델을 적용하면 매우 향상된다. 실험 커브와 가장 유사한 형태를 보여주는 경우는 B이며 가장 접근한 값을 보여주는 경우는 전체에 확장 충돌을 적용한 D의 경우이다. 고온의 경우인 Case 3, 4에서는 전체적으로 약간 과도한 예측을 보여주고 있는데, B의 경우가 비교적 적합한 것으로 판단된다.

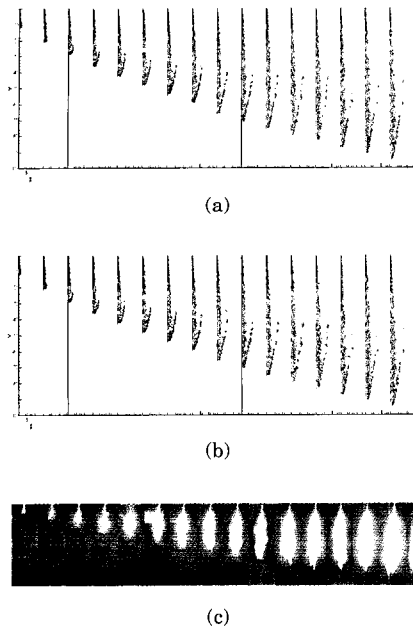


Fig. 3 Comparison of spray at injection press. 15MPa
 (a) Without extended grazing collision model
 (b) With extended grazing collision model
 (c) Photos by Lim and Park

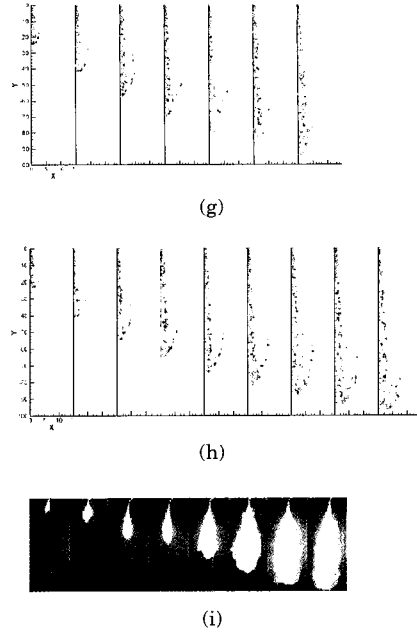


Fig. 5 Comparison of spray at injection press. 100MPa
 (g) Without extended grazing collision model
 (h) With extended grazing collision model
 (i) Photos by Lim and Park

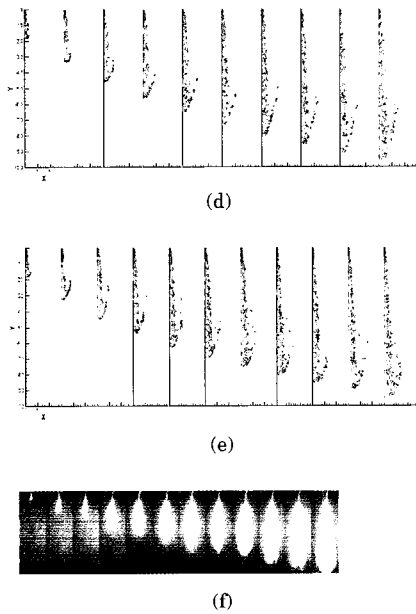


Fig. 4 Comparison of spray at injection press. 50MPa
 (d) Without extended grazing collision model
 (e) With extended grazing collision model
 (f) Photos by Lim and Park

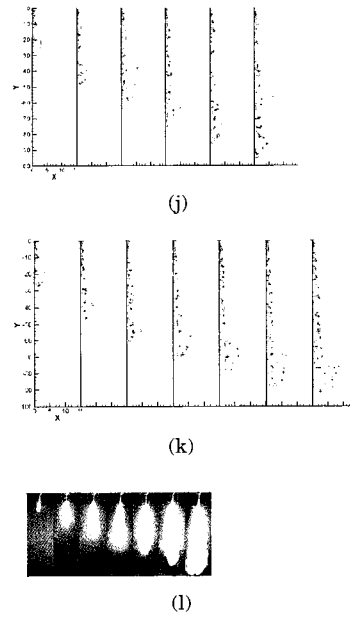


Fig. 6 Comparison of spray at injection press. 150MPa
 (j) Without extended grazing collision model
 (k) With extended grazing collision model
 (l) Photos by Lim and Park

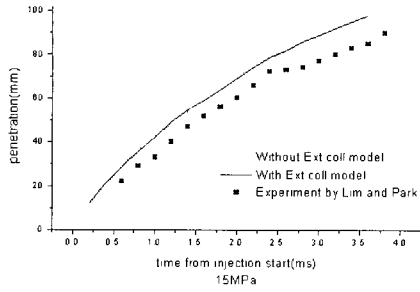


Fig. 7 Spray penetration at injection pressure 15MPa

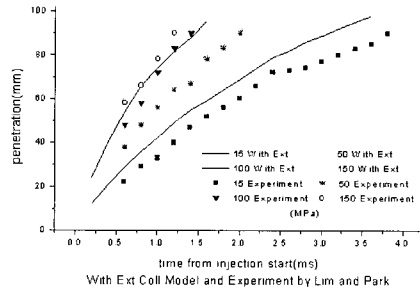


Fig. 11 Spray penetration with Ext. Coll. Model

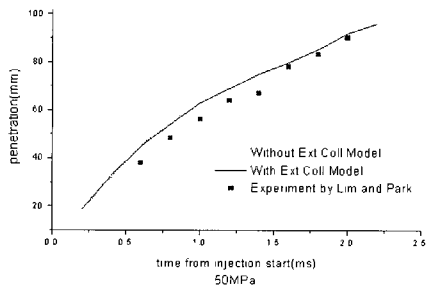


Fig. 8 Spray penetration at injection pressure 50MPa

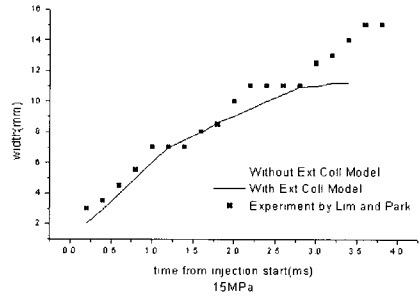


Fig. 12 Spray width at injection pressure 15MPa

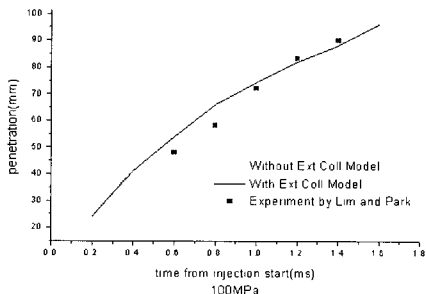


Fig. 9 Spray penetration at injection pressure 100MPa

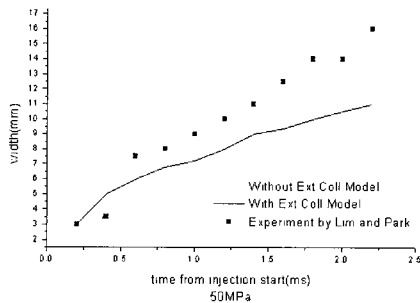


Fig. 13 Spray width at injection pressure 50MPa

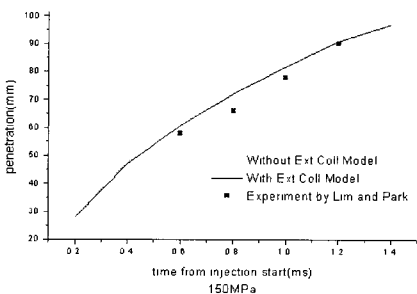


Fig. 10 Spray penetration at injection pressure 150MPa

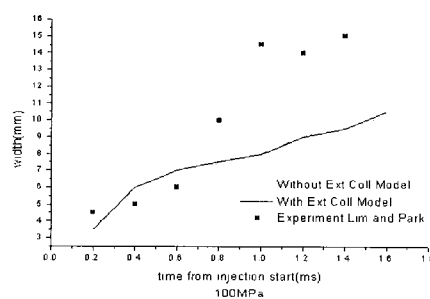


Fig. 14 Spray width at injection pressure 100MPa

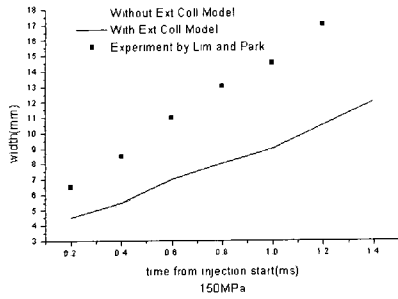


Fig. 15 Spray width at injection pressure 150MPa

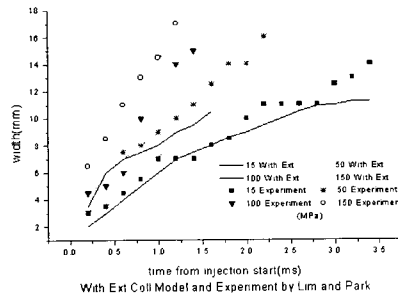


Fig. 16 Spray width Ext. Coll. Model and Experiment by Lim and Park and Experiment by Lim and Park

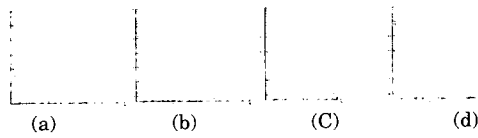


Fig. 17 Spray distribution for Case 1

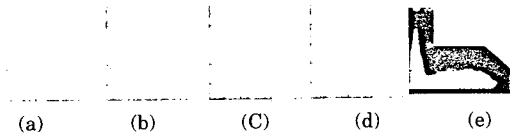


Fig. 18 Spray distribution for Case 2 Experiment

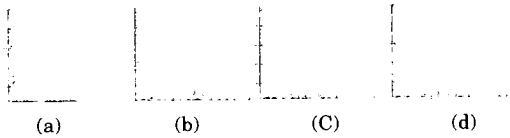


Fig. 19 Spray distribution for Case 3

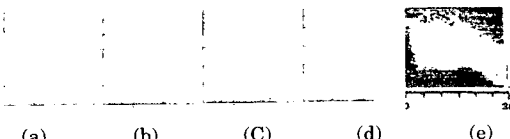


Fig. 20 Spray distribution for Case 4 Experiment

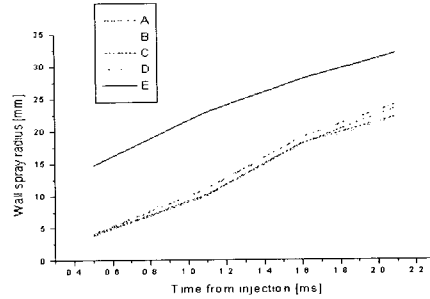


Fig. 21 Wall spray radius for Case 1

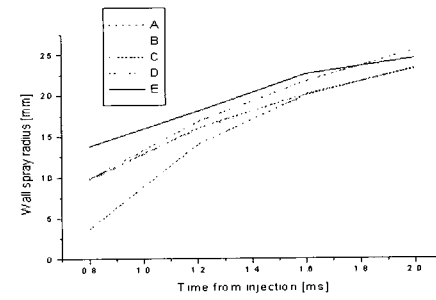


Fig. 22 Wall spray radius for Case 2

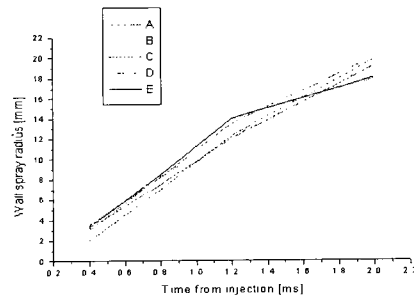


Fig. 23 Wall spray radius for Case 3

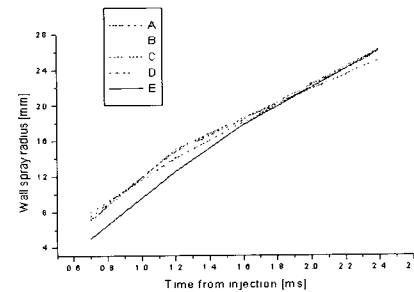


Fig. 24 Wall spray radius for Case 4

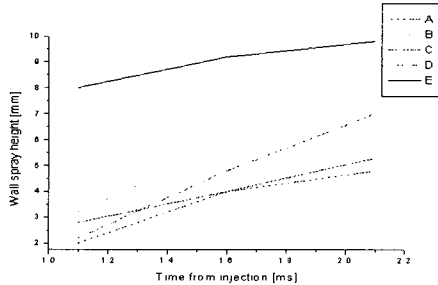


Fig. 25 Wall spray height for Case 1

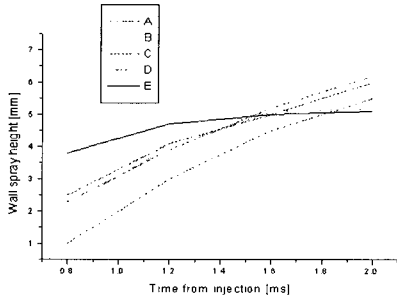


Fig. 26 Wall spray height for Case 2

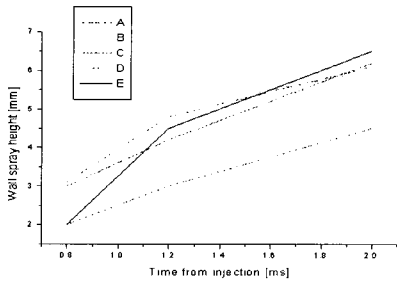


Fig. 27 Wall spray height for Case 3

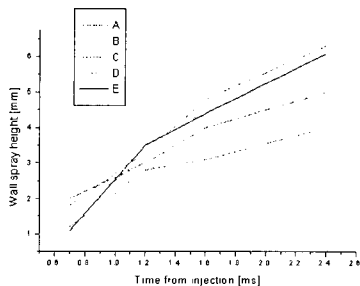


Fig. 28 Wall spray height for Case 4

충돌 분무의 높이

Fig. 25~28은 충돌후 액적들이 충돌면과 수직방향으로의 퍼짐 정도를 나타낸다. 분사조건과 기호는 충돌 분무 진행거리와 같다. Fig.25의 상온에서는 실험치와 모든 모델들이 큰 차이를 보이고 있다. 이 역시 앞에서와 같은 이유라고 할 수 있겠다.

Case 2의 경우 초기에는 모든 모델이 매우 낮은 예상을 하고 있으며, 시간이 지남에 따라 급격하게 증가하여 2.0ms에는 과도한 예측 결과를 보여주는데, C와 D는 Fig. 18에서 나타난 것처럼 비정상적인 진행에 의한 것으로 판단된다. B만이 실험치를 따라가는 가장 적합한 결과를 보여준다. 고온분위기에서는 확장충돌을 적용한 B, C 및 D의 경우 모두 상당히 실험치에 접근함을 보여주는데, B의 경우가 가장 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

확장 충돌 모델의 적용이 분무특성에 미치는 영향은 다음과 같이 정리된다.

자유 분무

▶고압으로 갈수록 분무 선단이 버섯 모양으로 넓게 퍼짐을 보여 주는데, 확장 모델의 적용은 이를 적절히 예측하는 결과를 보여 준다.

▶분무 진행거리에 대한 계산 결과는 모든 압력 에서 실험치를 넘고 있지만, 확장 모델을 적용하는 경우 고압에서 만족할 만한 예측 결과를 얻을 수 있었다.

▶분무 폭의 계산 결과는 실험 결과 보다 작은 값을 예측하고 있지만, 확장 모델을 적용하는 경우 향상된 결과를 가져왔다.

확장 모델을 적용하면 분무거리와 폭 방향의 분무거동을 향상시키는 결과를 나타내고 있으며, 특히 분무선단 형태가 보다 실험치와 유사함을 보여 준다.

충돌 분무

▶확장 충돌 모델을 적용하면 분무를 넓게 퍼

지게 하는 효과가 있으며, 분무사진과 유사한 형태를 보여준다. 단, 상온에서는 확장충돌 모델을 분무중심에 적용한 (c)와 (d)의 경우에 비정상적인 분무선단 모습을 나타낸다.

▶분무반경의 예측에는 상온의 경우 확장 충돌 모델이 큰 역할을 하지만, 고온분위기에서는 큰 차이가 없음을 보여준다.

▶분무 높이의 경우 확장 충돌 모델의 적용이 큰 역할을 함을 보여주는데, B를 제외하고는 저온 분위기에서 시간이 흐르면서 과도한 예측을 나타낸다.

▶유동의 경우 확장충돌모델의 적용은 충돌 액적의 분산효과가 강화됨을 알 수 있지만, 어떤 경우에는 비정상적으로 과도한 예측을 보여줌을 나타낸다. 이러한 비정상적인 과도 분포를 피하면서 분무의 확산을 활성화 시키기 위해서는 충돌면에만 확장모델을 적용하는 B의 경우가 가장 적합한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) J.M Tishkoff, Jr.D.C. Hammond and A.P Chraplyvy, "Diagnostic measurements of fuel spray dispersion", Transaction of ASEM, Vol. 104, 1982.
- 2) H. Kuniyoshi, H. Tanabe, G.T Sato and H. Fujimoto, "Investigation on the characteristics of diesel fuel spray", SAE Paper No. 800968, 1980.
- 3) M.M. Elkotb, H. Salem and M.E Awad, "Investigation of multi-fuel sprays in swirl chamber of diesel engines", ASME Paper No. 87-FE-6, presented at the energy-sources, Technology Conference and Exhibition. Dallas. Texas, 1987.
- 4) G.M. Faeth, "Evaporation and combustion of sprays", Vol. 3, Pergamon Press, Oxford, New York, 1983.
- 5) M.M. El Wakil, O.A. Uyehara and P.S. Myers, "A theoretical investigation of the heating up period of injected fuel droplet vaporising in air", NACA TN-3179, 1954.
- 6) G.L. Borman and J.H. Johnson, "Unsteady vaporisation histories and trajectories of fuel drops injected into swirling air", SAE Paper No. 598C, 1962.
- 7) C.T. Crowe, "A computational model for the gas droplet flow field in the vicinity of an atomiser", Western State Section, The Comb. Inst, Paper No. 74-25, Cited in Faeth, 1983.
- 8) C.T. Crowe, "A numerical model for the gas-droplet flow field near an atomiser", ICLASS-78, 1978.
- 9) A.D. Gosman and R.J.R. Johns, "Computer analysis of fuel-air mixing in direct-injection engines", SAE paper No. 800091, 1980.
- 10) K.R. Beshay, A.D. Gosman and A.P. Watkins, "Assessments of multidimensional diesel spray predictions", SAE Paper No. 861570, 1986.
- 11) H. Khaleghi, "Calculation and comparison with experimental data of liquid fuel sprays", MSc Dissertation, University of Manchester, Faculty of Technology, 1986.
- 12) J.D. Naver and R.D. Reitz, "Modelling engine spray/wall impingement". SAE paper No. 880107, 1988.
- 13) J.D. Naber, B. Enright and D. Farrel, "Fuel impingement in a direct injection diesel engine", SAE Paper 881316, 1988.
- 14) L.K. Shih and D.N. Assains, "Implementation of a fuel spray wall interaction model in KIVA-II", SAE Paper 911787, 1991.
- 15) R.D. Reitz and C.J. Rutland, "3-D modelling of diesel engine intake flow, combustion and emissions", SAE paper 911489, 1991.
- 16) T. Wakisaka, S.K Yoshida, Y. Isshiki and Y. Shimamoto, "A study on spray models for numerically analysing fuel spray behaviour", Proc. 11th Symp. on Internal Combustion Engines, JSME/JSAE, pp. 241-246, 1993. (in Japanese).
- 17) A.P. Watkins and D.M. Wang, "A new model for diesel spray impaction on walls and comparison with experiment", In Int. Symp. on Diagnostics and Modelling of combustion in I. C. Engines, Kyoto, 1990.
- 18) K. Park and A.P. Watkins, "The effect of non-orthogonal grids on spray and air flow predictions", KSME Journal, vol. 10, no. 4, pp. 458-470, 1996.
- 19) H.S. Lim and K. Park, "Comparison of LPG/Diesel Sprays in High Pressure Injection System", Proceeding of the KOSME 2000 Spring Annual Meeting, Paper M-77, 2000.

저 자 소 개



한진희 (韓鎭熙)

1976년 2월 16일생, 2001년 한국해양대학교 기계공학 졸. 동대학 대학원 기계공학과 입학.



조상무 (趙尙武)

1974년 12월 25일생, 2001년 한국해양대학교 기계공학 졸. 동대학 대학원 기계공학과 입학.



박권하 (朴權夏)

1960년 9월 1일생, 1982년 성균관 대학교, 1991년 UMIST 공학석사, 1995년 UMIST 공학박사, 1983~1991 현대자동차 제품개발 연구소, 1995~1998 한국기계연구원 엔진환경연구부, 1998~현재 한국 해양대학교 기계 정보공학부.