

벽면충돌분무 계산에서 확장충돌모델의 적용범위에 관한 고찰

정창화* · 박권하†
(2000년 8월 29일 접수, 2001년 5월 15일 심사완료)

A Study on Areas of Application of a Extended Collision Model in a Wall Impaction Spray Calculation

Changhwa Jeong and Kweonha Park

Key Words : Impaction Spray(충돌분무), Spray Density(분무밀도), Extended Collision Model(확장충돌모델)

Abstract

This paper addresses to the area where the extended collision model is applied. In order to find the optimum shape of wall sprays, the extended model is applied to the nearest cells of just over the impaction wall, spray core or over all. The droplet distribution, wall spray radii, heights and gas flows are shown in all the cases. Those results show that the best spray shape represents in the case applying the extended model just on the impinging wall.

기호설명

- U^i : 수직유량
- u^i : 직교좌표성분 속도벡터
- \sqrt{g} : 제어체적항
- P_{ij} : 면적벡터
- q_{ij} : 형상항
- μ_{eff} : 유효점성계수
- θ : 보이드율
- D_d : 액적직경
- v_d : 액적속도
- v_{at} : 충돌후 벽면수직액적속도
- v_{an} : 충돌후 벽면수평액적속도

1. 서론

분무액적의 벽면 충돌현상은 연료를 직접분사하는 디젤기관의 해석에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 지구 온난화 및 에너지 절약측면에서 효율이 우수한 디젤기관은 그 적용이 확대되고 있으며 특히 소형고속 디젤기관에 대한 개발이 빠르게 진행되고 있다. 고속분사 시스템을 채용한 소형 연소실에서는 액적들의 벽면 충돌을 피할 수가 없고 이때 나타나는 연소실벽의 유막형성은 디젤 배기가스의 직접적인 원인이 되고 연료의 증발, 혼합에 아주 큰 영향을 미친다. 그래서 최적의 연소실 설계를 위해 충돌면에서의 액적의 움직임과 충돌후 액적의 움직임, 연료의 퍼짐 등의 현상을 적절히 이해하고 해석하는 것이 연소실 연소 해석에서 가장 중요한 요소가 되고 있다. 기존의 충돌 분무해석의 방법이었던 여러 가지 모델들을 소개해 보면 Fig. 1에서와 같이 기존의 KIVA Original code는 충돌분무의 액적들의 벽면 충돌후 거동을 해석하기엔 부적합하였으

* 한국해양대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 한국해양대학교

Email: khpark@hanara.kmaritime.ac.kr

FAX : (051)405-4790 TEL : (051)410-4367

며 단지 액적들이 충돌면에 붙어있는 정도의 해석밖에 하지 못하였다. 그래서 Naver와 Reitz⁽¹⁾는 충돌후 액적이 충돌면에 부착되는 것으로 가정한 Stick 모델의 정체성을 보완하여 Reflect 모델과 Jet 모델을 제안하고 이를 엔진에 적용⁽²⁾하였다. 그들의 계산결과는 Jet 모델이 가장 적절하다는 결론을 제시하였지만 포화온도 이하에서만 고려하였고 웨버수에만 의존하여 수평방향으로 실제 분무 거동을 크게 초월하였으며, 액적들이 충돌면에 집중되는 현상을 보여주고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Shih와 Assanis,⁽³⁾ Reitz와 Rutland⁽⁴⁾와 Wakisaka⁽⁵⁾ 등은 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⁽⁶⁾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. 그리고 액적을 액상과 기상으로 분리하여 액상을 분리된 액적으로 기상은 PISO 알고리즘을 이용하여 해석하였다. 결과적으로 액적의 퍼짐이 실험과 비교하여 부족함을 보여주었는데, 특히 벽면과 수직방향으로는 많은 차이를 나타내었다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Watkins와 Wang⁽⁶⁾은 확장 충돌모델(Grazing collision model)을 그들의 충돌모델⁽⁵⁾에 추가하였는데 유막의 형성과 붕괴 과정은 그들의 모델에 적용하지 않았다. 결과적으로 벽면의 수직방향으로 많은 개선의 효과를 보여주었다. 하지만 수평방향으로는 더욱 좋지 못한 영향을 주었다. Park와 Watkins⁽⁷⁾는 액적이 벽면과 충돌할 때 충돌면에 유막을 형성하며 펼쳐지는데 이때의 확장속도가 액적의 표면 장력을 증가하게 되면 작은 액적들로 분리되면서 뿜겨 나가는 현상을 고려하여 모델링 하였다. 그들에 의하면 많은 경우 다른 모델과 비교하여 우수한 결과를 보여주고 있는데 실험결과와 비교하여 수직방향의 퍼짐이 아직 부족함을 나타내었다.

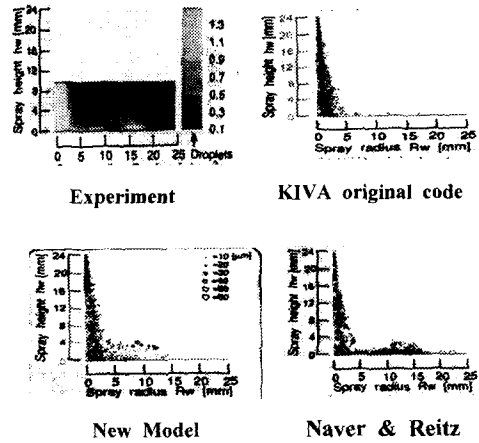


Fig. 1 Comparison of spray distributions

본 연구에서는 Park⁽⁷⁾의 모델에 국부적으로 확장 충돌 모델을 적용하였을 때 기존의 모델에 비해 얼마나 더 적절한 벽면 분무거동을 예측할 수 있는 지와 확장충돌 모델의 적용범위가 어떻게 영향을 미치는지에 대해 고찰하고자 한다.

2. 수학적 모델

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 연료증발방정식이 Eulerian형으로 주어지며, 고압축성유동에 대한 $k-\epsilon$ 모델이 적용된다. 액상의 유동에 대하여는 움직이는 케적, 운동량, 질량 및 에너지방정식은 Lagrangian형으로 쓰여지며, 각 액적군은 크기, 온도, 속도 등 모든 성질이 동일한 수천 개의 액적으로 이루어진다. 액상에 대한 기상의 영향은 액상의 방정식에서 전단응력의 항으로 고려되며, 기상에 대한 액상유동의 영향은 기상의 방정식에서 생성항의 형태로 고려된다. 속도/압력쌍의 해석은 PISO 알고리즘을 사용하여 해석된다.

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

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

여기에서 U^i 는 수직유동항, u^i 는 속도벡터 \vec{V} 의 직교좌표성분이며, P_{ij} 는 면적벡터의 직교

좌표성분이다. 액적간의 충돌 및 분열현상은 각각 O'Rourke와 Bracco,⁽⁸⁾ Reitz와 Diwaker⁽⁹⁾에 의하여 제시된 모델을 사용한다. 분무액적의 벽면충돌 모델은 개별 액적의 실험결과(Araki와 Moriyama,⁽¹⁰⁾ Jayaratne과 Mason,⁽¹¹⁾ Wachters와 Westerling⁽¹²⁾에 기본을 두고 있다. 이들 실험은 충돌후 액적이 충돌면의 수직방향과 수평방향으로 나뉘어 거동됨을 보여주고 있으며, 역시 충돌전 액적의 웨버 넘버에 의존함을 보여준다. 이들 실험에 기본을 두고 안정영역과 불안정영역으로 분리하여 모델링하였다. 그 모델을 요약하면 다음과 같다.

We<80인 경우;

$$v_{an} = -\alpha v_{bn} \tag{3}$$

$$v_{at} = v_{bt} \tag{4}$$

$$D_{da} = D_{db} \tag{5}$$

We>80인 경우;

$$v_{an} = -R_{xx} \left(\frac{\sigma We_a}{\rho D_{da}} \right)^{0.5} \tag{6}$$

$$v_{at} = v_{bt} \pm R_{xx} v_f \tag{7}$$

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^{\frac{1}{3}}} \tag{8}$$

기존의 충돌모델에서 액적이 벽면 충돌후 벽의 얇은 층에서 축적되고 퍼져나가지 못하는 단점을 보완하기 위해 확장충돌모델을 적용시킨다. 이 모델은 액적들의 밀집정도를 고려한 것으로 내용을 요약하면 다음과 같다.

$$\alpha_n = (1 - \theta^b) p \alpha \tag{9}$$

$$v_{dn} \cdot (v_d \times \nabla \theta) = 0$$

$$|v_{dn}| = |v_d|$$

v_d 는 액적의 속도이다. 그리고 여기서 α_n , a 는 각각 v_d 와 $\nabla \theta$ 사이의 각이다.

3. 계산 조건

연료충돌 분무 거동을 예측하는데 있어서 확장충돌 모델의 적절한 적용을 위하여 그리고 계산 격자가 각 과정마다 다를 경우 격자의 변화가 액적들의 움직임에 주는 효과를 막아 정확한 비교를 위해 Table 1과 같이 분사 압력, 주위공기 조

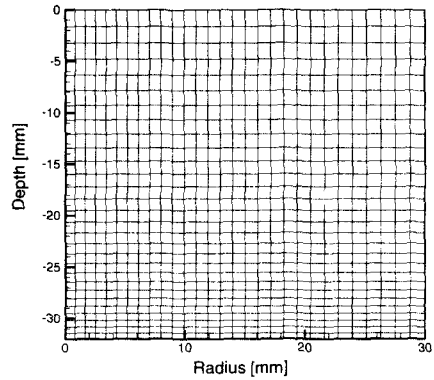


Fig. 2 Calculation grids

Table 1 Test 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	16.4	19.6
Nozzle diameter(mm)	0.265	0.3	0.2	0.25
Reference	(13)(14)	(15)	(16)	(17)

건, 충돌면 위치가 다른 경우를 선택한다. 그리고 기준조건에서 사용한 격자를 모든 경우에 동일하게 적용한다.

계산격자는 Fig. 2와 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분무형상

Fig. 3과 4는 상온에서 실험한 Case 1과 2의 분사후 시간이 2.1, 2.0ms일 때의 분무형상을 비교한 것으로 (a)는 Park와 Watkins⁽⁷⁾모델만을 적용한 경우이고 (b)는 Park의 모델⁽⁷⁾에 확장충돌모델⁽⁶⁾을 벽면위 첫 번째 셀에만 적용한 경우이며 (c)는 벽면위 첫 번째 셀과 분무 중심셀에 (d)는 전체 영역에 확장충돌모델을 적용한 경우이다. (e)는 각

경우의 실험결과를 보여준다. Park의 모델만을 적용한 (a)의 경우 충돌후 많은 액적들이 벽면에 주로 분포함으로써 벽면위로의 퍼짐이 부족하며 Fig. 4(a)에서 보여주는 것처럼 액적간 상호결합에 의한 매우 큰 액적들이 벽면에 나타나는 것을 알 수 있다. 확장 충돌 모델을 적용한 (b),(c),(d)의 경우에는 (a)의 경우보다 많은 액적이 벽면위로 분포됨을 보여주는데 실험사진과 비교여 볼 때 (c),(d)의 경우는 분무선단에 비정상적인 분무 거동을 보여주고 있다. Fig. 5와 6은 고온인700K,

773K에서의 분무형태를 보여준다. 확장충돌모델을 적용하지 않은 (a)의 경우에는 역시 분무퍼짐의 정도가 부족함을 알 수 있다. (b),(c),(d)는 (a)보다 분무퍼짐이 월등함을 나타내는데 서로 큰 차이는 없어 보인다. 액적의 분포 형태에서 살펴 보면 상온 분위기에서의 분무 계산에서는 충돌면에만 확장충돌모델을 적용한(b)의 경우가 가장 적합한 것으로 판단되며 고온 분위기의 경우에는 확장충돌모델의 적용범위와는 크게 상관이 없을 수 있다.

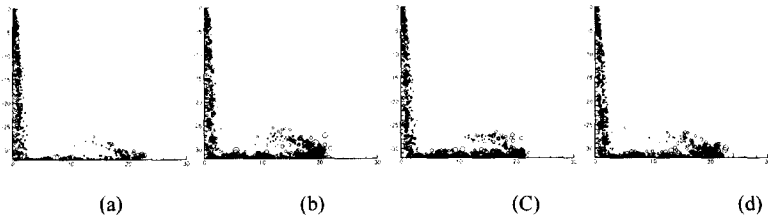


Fig. 3 Spray distribution for Case 1

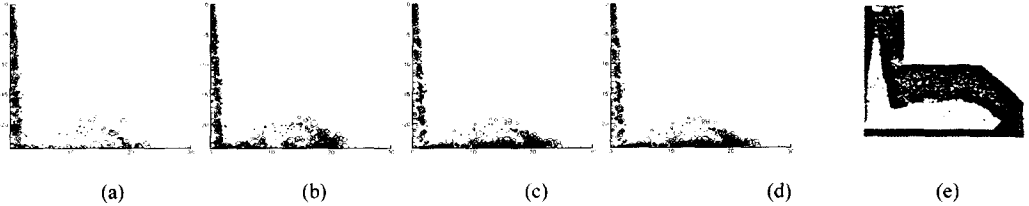


Fig. 4 Spray distribution for Case 2

Experiment

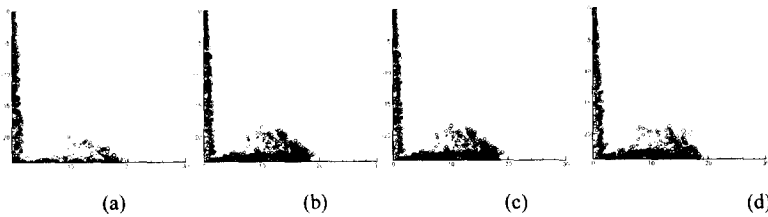


Fig. 5 Spray distribution for Case 3

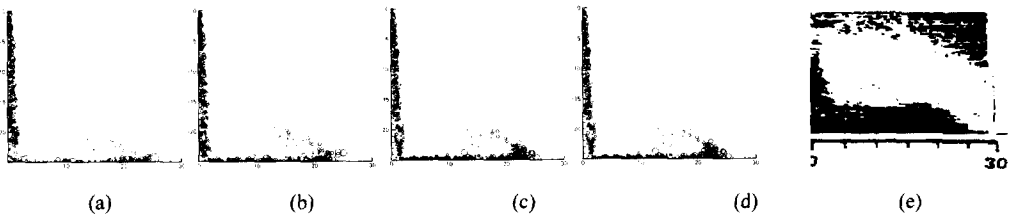


Fig. 6 Spray distribution for Case 4

Experiment

4.2 충돌분무 진행거리와 높이

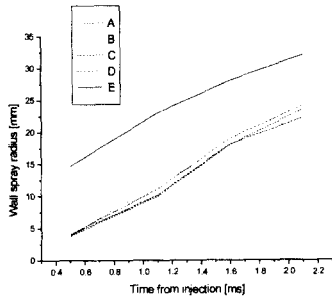


Fig. 7 Wall spray radius for Case 1

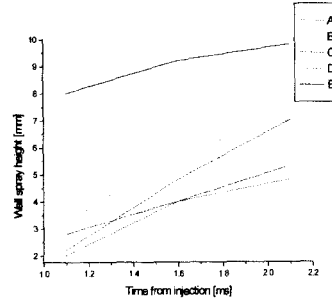


Fig. 11 Wall spray height for Case 1

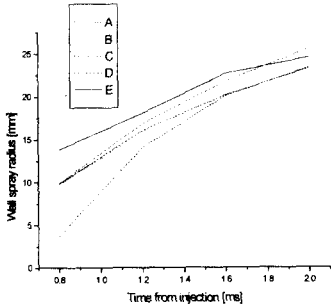


Fig. 8 Wall spray radius for Case 2

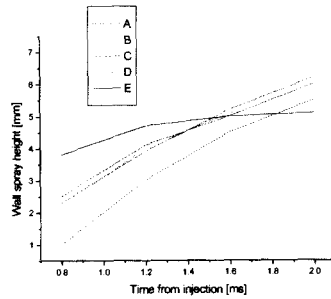


Fig. 12 Wall spray height for Case 2

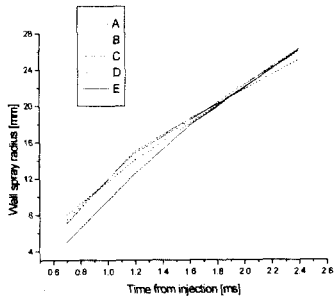


Fig. 9 Wall spray radius for Case 3

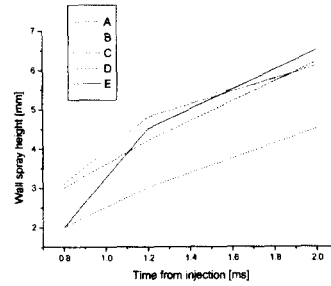


Fig. 13 Wall spray height for Case 3

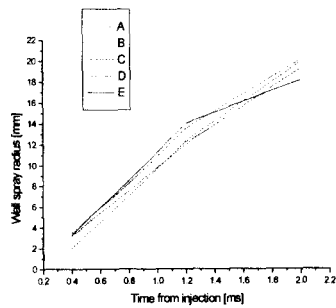


Fig. 10 Wall spray radius for Case 4

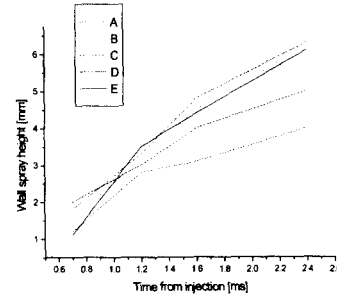


Fig. 14 Wall spray height for Case 4

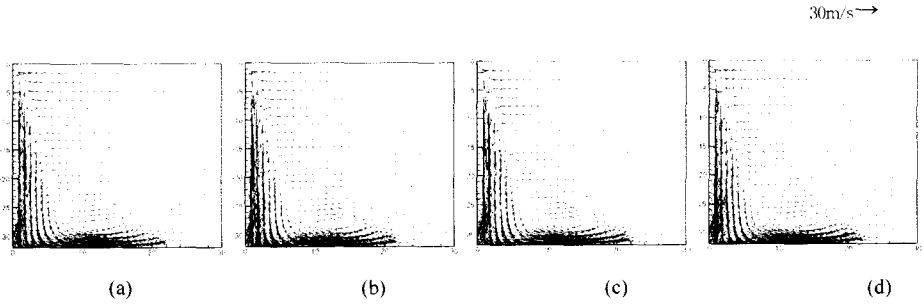


Fig. 15 Case 1

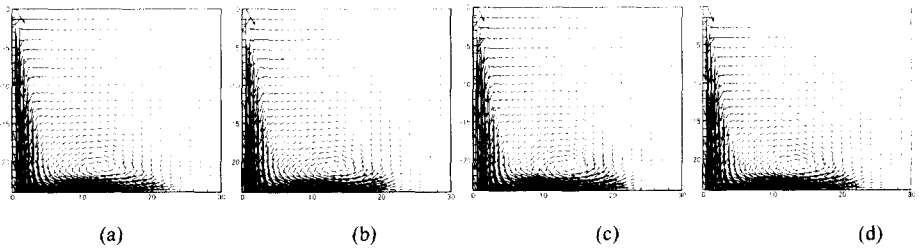


Fig. 16 Case 2

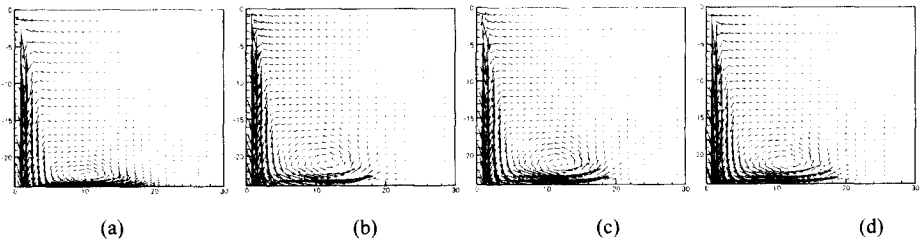


Fig. 17 Case 3

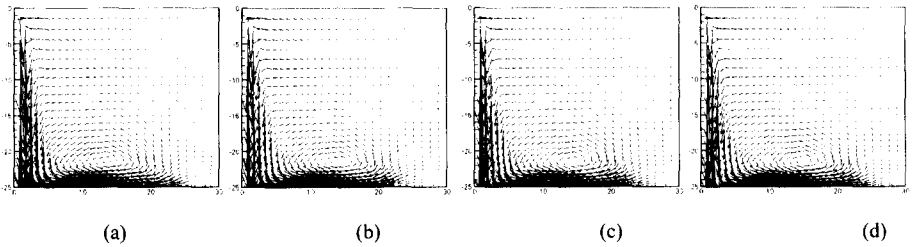


Fig. 18 Case 4

Fig. 7과 8은 상온에서 실험한 Case 1 과 2의 분사후 시간이 2.1, 2.0ms일 때의 충돌후 액적들이 충돌면과 수평방향으로 퍼져나가는 거리를 비교한 것이고 Fig. 9와 10은 고온인 700K와 773K에

서 비교 한 것이다. A는 Park과 Watkins⁽⁷⁾의 모델에만 적용한 경우이고 B는 Park의 모델⁽⁷⁾에 확장 충돌모델⁽⁶⁾을 벽면위 첫 번째 셀에만 적용한 경우이며 C는 벽면위 첫 번째 셀과 분무 중심셀에

D는 전체 영역에 확장충돌모델을 적용한 경우이다. E는 각 경우의 실험결과를 보여준다.

상온의 분위기에서 충돌면이 멀리 떨어진 즉 벽의 길이가 가장 긴 Case 1의 경우에는 Fig. 7에서 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 보여주는데 확장충돌모델을 적용하면 매우 향상된다. 실험 커브와 가장 유사한 형태를 보여주는 경우는 B이며 가장 접근한 값을 보여주는 경우는 전체에 확장충돌을 적용한 D의 경우이다. 고온의 경우인 Case 3과 4에서는 전체적으로 약간 과도한 예측을 보여주고 있는데 B의 경우가 비교적 적합한 것으로 판단된다.

Fig. 11부터 Fig. 14까지는 충돌후 액적들이 충돌면과 수직방향으로의 퍼짐 정도를 나타낸다. 분사조건과 기호는 앞절과 같다. Fig. 11의 상온에서는 실험결과와 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 예측결과를 보여주는데 C와D는 Fig.4에서 나타난 것처럼 비정상적인 진행에 의한 것으로 판단된다. B만이 실험치를 따라가는 가장 적합한 결과를 보여준다. 고온분위기에서는 확장충돌을 적용한 B,C,D의 경우 모두 상당히 실험결과에 접근함을 보여주는데 B의 경우가 가장 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

4.3 유동특성

Fig. 14부터 17까지는 각각 Case 1부터 Case 4까지에 대한 유동상태를 보여준다. (a),(b),(c),(d)는 앞에서와 같이 확장 충돌모델을 적용하지 않은 경우, 충돌면에서만 적용한 경우, 분무중심과 충돌면에만 적용한 경우 그리고 전체에 적용한 경우를 나타낸다. 전반적으로 확장 충돌모델을 적용한 경우가 와류동이 활성화됨을 보여주는데, 고온에서의 경우에는 확연한 차이를 보여주는 것을 알 수 있다. Case 3의 (a)와 (b)를 비교할 때 알 수 있는 것처럼 확장충돌모델은 분무 선단 영역에서 벽면 위로 올라가는 유동 크게 활성화하는 역할을 한다.

5. 결 론

(1) 확장충돌모델을 적용하면 분무를 넓게 퍼지게 하는 효과가 있으며 분무사진과 유사한 형태를 보여준다. 단 상온에서는 확장충돌모델을 분무중심에 적용한 (c),(d)의 경우에 비정상적 분무 선단 모습을 나타낸다.

(2) 분무반경의 예측에는 상온의 경우 확장충돌 모델이 큰 역할을 하지만 고온분위기에서는 큰 차이가 없음을 보여준다.

(3) 분무 높이의 경우 확장충돌모델의 적용이 큰 역할을 함을 보여주는데, B를 제외하고는 저온 분위기에서 시간이 흐르면서 과도한 예측을 나타낸다.

(4) 유동의 경우 확장충돌모델의 적용은 충돌액적의 분산효과가 강화됨을 알 수 있지만 어떤 경우에는 비정상적으로 과도한 예측을 보여줌을 나타낸다. 이러한 비정상적인 과도분포를 피하면서 분무의 확산을 활성화시키기 위해서는 충돌면에만 확장모델을 적용하는 B의 경우가 가장 적당한 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Naver, J.D. and Reitz, R.D., 1988, "Modelling Engine Spray/Wall Impingement," *SAE paper No. 880107.*
- (2) Naver, J.D., Enright, B. and Farrel, D. 1988, "Fuel Impingement in a Direct Injection Diesel Engine," *SAE Paper 881316.*
- (3) Shih, L.K. and Assains, D.N, 1991, "Implementation of a Fuel Spray Wall Interaction Model in KIVA-II," *SAE paper 911787.*
- (4) Reitz, R.D. and Rutland, C.J., 1991, "3-D Modelling of Diesel Engine Intake Flow, Combustion and Emissions," *SAE paper 911489.*
- (5) Wakisaka, T., Yoshida, S.K., Isshiki Y., and Shimamoto, Y., 1993, "A Study on Spray Models

- for Numerically Analysing Fuel Spray Behaviour," *Proc. 11th Symp. on Internal Combustion Engines, JSME/JSAE*, pp. 241~246. (in Japanese).
- (6) Watkins, A.P. and Wang, D.M., 1990, "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.
- (7) Park, K. and Watkins, A.P., 1996, "The Effect of Non-orthogonal Grids on Spray and Air Flow Predictions," *KSME Journal*, Vol. 10, No. 4, pp. 458~470.
- (8) O'Rourke, P.J. and Brocco, F.V., 1980, "Modelling of Drop Interactions in Thick Sprays and a Comparison with Experiment," In *Stratified Charge Automotive Engine Conf. I.Mech.E.*
- (9) Reitz, R.D. and Kiwakar, R., 1986, "Effect of Drop Break-up on Fuel Sprays," SAE 860469.
- (10) Araki, K. and Moriyama, A., 1982, "Deformation Behaviour of a Liquid Droplet Impinging on a Hot Metal Surface," In *Int. Cont. on Liquid Atomization and Spraying Systems ICLASS-82*.
- (11) Jayaratne, O.W. and Mason, B.T., 1964, "The Coalescence and Bouncing of Water Drop at Air/Water Interface," *Proc. R. Soc. Lond-A* 280, p. 545.
- (12) Wachters, L.H.J. and Westerling, N.A.J., 1966, "The Heat Transfer from a Hot Wall to Impinging Water Drops in the Spheroidal State," *Chemical Engineering Science*, 21, p. 1047.
- (13) Mirza, R., 1991, "Studies of Diesel Spray Inter Acting with Cross-Flow and Solid Boundaries," PhD Thesis, University of Manchester, Faculty of Technology.
- (14) Wang, D.M., 1992, "Modeling Spray Wall Impaction and Combustion Process of Diesel Engines," PhD thesis, University of Manchester, Faculty of Technology.
- (15) Katsura, N., Satio, M. Senda J. and Fujimoto, H., 1989, "Characteristics of a Spray Impinging on a Flat Wall," *SAE Paper* 890264.
- (16) Senda, J., Fukami, Y. Tanabe, Y. and Fujimoto, H., 1992, "Visualization of Evaporative Diesel Spray Impinging upon Wall Surface by Exciplex Fluorescence Method," *SAE Paper* 920578.
- (17) Suzuki, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., 1993, "Simultaneous Concentration Measurement of Vapour and Liquid in an Evaporating Diesel Spray," *SAE Paper* 930863.