

새로운 충돌모델을 이용한 신형식 디젤연소실 분석

장원석*, 김덕줄**, 박권하***

Analysis of New DI Diesel Combustion Chamber System using New Spray Wall Impaction Model

W.S. Chang*, D.J. Kim**, and K. Park***

Wall wetting in diesel engines has been considered as a bad phenomenon because of fuel deposition which makes fuel/air mixing and evaporation worse. In order to avoid the problem, many research works have been carried out. One of the studies is on new combustion chamber systems which are using spray impacting on a wall.

In this study a new type of chamber system is analysed using wall impaction model introduced and assessed in the coupled 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 in Lagrangian form.

With various conditions the spray distribution, vapor contour and gas flows are analyzed, and then design factors of those combustion systems are recommended.

Key Words: 디젤분무(Diesel Spray), 연소실(Combustion Chamber), 충돌분무(Impacting Spray), 벽면충돌모델(Wall Impaction Model)

기호설명

U^i : normal flux component

u^i : cartesian components of a velocity vector

\sqrt{g} : Jacobian determinant

P_{ij} : cartesian components of the area vector

q_{ij} : geometric relations

θ : void fraction

I : diffusivity

ρ : density

S : source

D : drop diameter

R_{xx} : random variable

v : drop velocity

α : energy coefficient

*부산대학교 기계설계공학과 대학원

**부산대학교 기계설계공학과

***한국기계연구원 동력시스템연구부

1. 서 론

분사연료의 벽면층돌을 이용하는 연소실시스템에 대한 연구는 소형디젤엔진의 연소효율 향상과 배기저감의 측면에서 많은 연구가 진행되고 있다.

Kroeger[1]는 매탄올연료를 사용하는 직접분사식 디젤엔진의 연소실 중심에 층돌부를 마련하고 이 곳에 분사연료를 층돌시킴으로서 분무의 방향을 연소실중앙부로 바꾸고 연료액적의 유막형성을 최소화 하였다. Kato와 Onish[2]는 유사한 형태의 연소실을 층상급기형 가솔린엔진에 적용하였으며, 계속적으로 개선하고 있다. 그들[3]은 역시 직접분사식 디젤엔진에 동일한 형태의 연소실시스템을 적용하였고 엔진실험을 행하였다. 단공분사노즐을 이용하였으며 여기에서 분무된 액적들은 연소실 중앙부에 마련된 돌출부에 충돌하여 더욱 작은 액적으로 2차 분쇄되며 연소실벽면으로 부터 멀리 연소실 중앙부로 퍼지게 된다. 이 액적들은 피스톤운동에 의하여 발생하는 스퀴쉬유동의 영향에 의하여 연소실내부에 골고루 퍼지게 된다. Park와 Watkins[4, 5]는 그들의 계속되는 논문에서 신형식 소형디젤엔진을 제시하고 분석하였다. 5개의 분공을 갖으며, 각 분공으로부터 분사된 연료는 연소실내에 미리 마련된 돌출부에 충돌하여 분쇄되고 연소실내부에 충분히 퍼지게 함으로서 주위공기와 섞임 및 연료증발을 충분히 하고 연소효율을 향상하도록 하였다.

이상의 신형식 엔진에서는 연소실 중앙에 돌출된 분무층돌부를 갖으며, 액적의 2차 분쇄효과와 분쇄된 액적들에 의하여 야기되는 새로운 방향의 유동효과를 얻고 있다. 본 논문에서는 단공분사노즐을 이용한 Kato와 Onish에 의하여 제시된 신형식 디젤엔진[3]의 스퀴쉬에 의하여 발생된 텀블유동효과와 분무조건을 분석함으로써 이러한 형태의 연소실을 설계할 때 고려하여야 할 점들을 제시하고자 한다.

2. 수학적모델

박[6]에 의하여 제시된 새로운 분무의 벽면층돌모델을 포함한 수학적 모델을 이용하였으며

다음과 같이 간략화된다.

기상의 유동에 대하여는 연속방정식, 운동량 방정식, 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.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho\phi) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^i}(\theta\rho U^i\phi - \frac{\theta\Gamma_{\phi q i}}{\sqrt{g}} \frac{\partial \phi}{\partial \xi^i}) = \theta S_{\phi} + S_{\phi}^d \tag{1}$$

새로운 벽면층돌모델은 개별액적의 실험결과(Araki 와 Moriyama[6], Jayaratne 과 Mason[7], Wachters 와 Westerling[8])에 기본을 두고 개발되었으며, 층돌후 액적의 거동을 계산하기 위하여 액적의 속도성분을 층돌면의 수직방향과 수평방향으로 나누어 계산 하였다. 역시 층돌전 액적의 웨버넘버의 함수로 표현하였다. 층돌모델을 요약하면 다음과 같은 방정식으로 표현된다.

We<80인 경우;

$$v_{an} = -\alpha v_{bn} \tag{2}$$

$$v_{at} = v_{bt} \tag{3}$$

$$D_{da} = D_{db} \tag{4}$$

We>80인 경우;

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

$$v_{at} = v_{bt} \pm R_{xt} v_t \tag{6}$$

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^{\frac{1}{3}}} \tag{7}$$

여기에서 하첨자 n, t는 각각 층돌면과 수직

및 수평방향을 나타낸다.

3. 계산조건 및 격자생성

신형식엔진을 분석하기 위하여, 우선 Kato와 Omishi[3]의 실험에 의하여 제시된 분무의 형상을 계산하였다. 이 때의 조건을 기준으로 계산 조건을 설정하였으며 Table 1에 나타낸다. Fig.1은 계산에 사용된 격자로서 20×25격자수를 갖으며, 계산의 정도를 높이기 위하여 격자가 경계형상을 따르지 않고 분무유동을 따라 생성되었다. 분사노즐은 좌상단에 위치하며 피스톤의 움직임은 고려되지 않았다. Fig.2는 실험조건인 주위공기압력 1.8MPa, 분사압력 19.6MPa에서 분사가 시작된 직후의 유동을 보여주며,

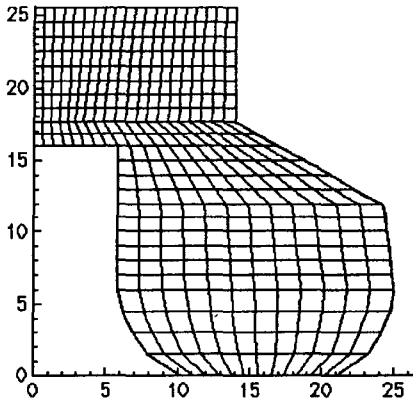


Fig.1 Computational Grids

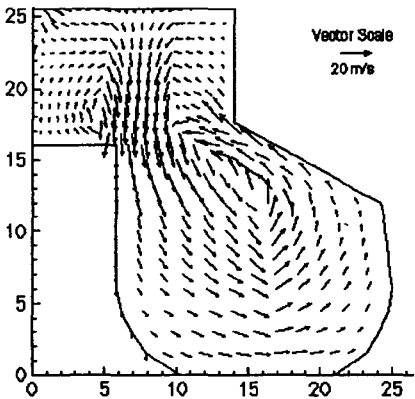
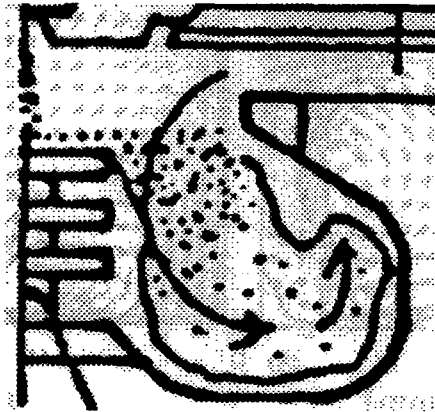
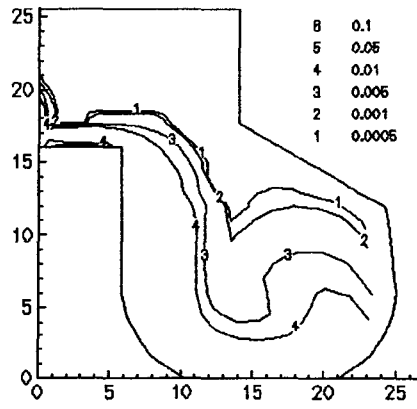


Fig.2 Initial Gas Flow in Chamber



(a)



(b)

Fig.3 Comparison of Spray and Vapor Contours :

- (a) Experimental Result
- (b) Calculative Result

Test cases	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wall dist (mm)	9.5								
Trap pres (MPa)	0.6	1.8	4.5	1.8		1.8			
Trap temp (K)	773								
Nozzle dia (mm)	0.3								
Tumble strength(m/s)	40		20	40	300	40			
Inj. pres (MPa)	19.6		19.6			7.4	19.6	39.2	

Table 1 Calculation Conditions

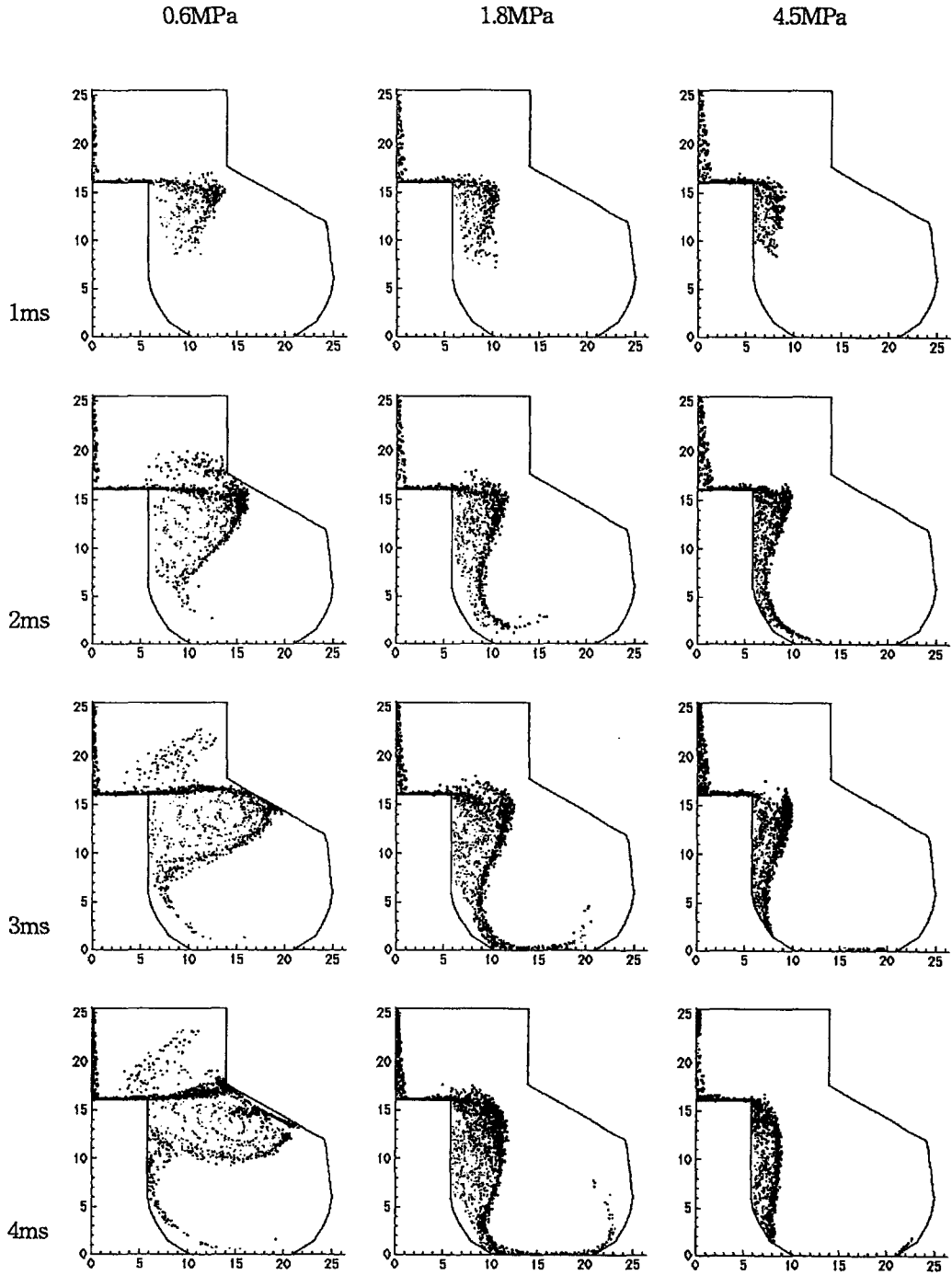


Fig.4 Spray Development with Trap Pressure Variation

이 때 계산결과는 실험결과와 잘 일치하고 있다(Fig.3). 스퀴쉬에 의하여 발생된 연소실내부 유동은 최대 40m/s의 텀블유동을 갖는다.

본 계산은 실험결과와 동일한 조건을 기준으로 하여, 텀블유동효과를 분석하였으며, 역시 동일한 조건을 기준으로 하여 분사압력 및 주위공기 압력의 영향을 파악하였다.

4. 분위기압 효과

Cases 1-3는 다른조건들을 동일하게 유지하면서 분위기 압력을 0.6에서 4.5MPa까지 변화시키는 경우이다. Fig.4는 분위기압력변화에 따른 액적거동을 시간의 진행과 함께 비교하였다. 분위기 압력이 0.6일 때, 분무가 신속히 진행됨을 보여주는 데 분사 후 1ms에서 충돌분무의 선단은 꾸준히 충돌부의 외곽으로 진행되고 있으며, 자유분무에서와 같이 버섯모양을 하고 있다. 2ms가 되면 분무가 연소실 외벽에 2차충돌하게 되며 벽면주위에 분포함을 알 수 있다. 하지만 잔여하고 있는 텀블의 영향에 의하여 외벽 충돌분무의 아래 액적들은 계속적으로 텀블유동을 따라 길게 꼬리를 형성하고 있다. 분위기압이 1.8MPa이 되면 연소실외벽에 2차충돌이 없으며 분무의 유동은 텀블유동을 따라 진행된다. 이때 분무의 선단액적들은 대부분 증발되어 사라지게 된다. 압력이 더욱 높아져서 4.5MPa이 되면, 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 충돌면에 충돌한 액적들이 더 이상 연소실 중앙부로 퍼져나가지 못하고 충돌부의 옆벽면을 타고 흘러 내리는 현상을 나타낸다.

Fig.5는 4ms에서의 공기유동을 나타낸다. 상기의 분무유동과 유사함을 알 수 있는 데, 압력이 작은 Case 1인 경우 분무유동을 동반한 힘찬 유동의 발생을 보여준다. 텀블유동을 가로지르면서 외벽을 향하여 진행하는 충돌분무에 의한 유동을 볼 수 있으며, 그 유동의 상하로 발생되는 강한 난류유동을 동반한다. 압력이 높아지면 충돌분무에 의한 유동의 영향이 저하되고 초기 텀블유동을 따르는 것을 알 수 있었다.

Fig.6은 4ms에서의 증발연료농도를 나타낸다. 역시 분무 및 공기유동과 유사한 분포를 보여준

다. 압력이 작은 Case 1인 경우 액적의 2차 충돌에도 불구하고 넓은 범위에 분포하고 있으며, 압력의 증가와 함께 충돌면과 연소실벽면 주위에 가까이 분포함을 보여준다.

5. 텀블유동 효과

Cases 4-6는 다른 조건들을 동일하게 유지하면서 최대텀블유동을 20에서 300m/s까지 변화시키는 경우이다. Fig.7는 초기텀블강도에 따른 액적거동을 시간의 진행과 함께 비교하였다. 텀블강도가 작은 경우, 앞에서 분석한 분위기 압력이 0.6일 때와 같이 충돌 후 분무의 진행이 강력하여 연소실 외벽에 2차충돌하게 되며 이곳 주위에 액적들이 집중분포함을 알 수 있다. 하지만 Case 1과 같이 2차 충돌 후 액적들이 충분히 멀리 분포되지 못하고, 스윙유동과 함께 벽면 주위로 되돌리는 거동을 한다. 한편 강력한 텀블유동은 다른 경우와 매우 다른 거동을 보여준다. 충돌분무가 중앙충돌면을 벗어나면서 강한 유동의 영향으로 충돌부벽면을 따라 흐르게 되지만, 역텀블의 영향에 의하여 조금 더 진행된 액적들은 충돌면 위쪽으로 분포되는 것을 보여준다.

Fig.8는 4ms에서의 공기유동을 나타낸다. 상기의 분무유동과 유사함을 알 수 있는 데, 텀블강도가 작은 경우에는 텀블의 영향이 많이 감소되어 분무유동에 유입되는 모습을 보여준다. 텀블강도가 300m/s에 이르면, 연소실 전체에 강한 텀블유동이 나타난다. 이 텀블유동은 연료분무가 충돌면을 벗어난 후의 진행을 막아 분무를 중앙측 벽면으로 되돌아가게 한다.

Fig.9는 4ms에서의 증발연료농도를 나타낸다. 역시 분무 및 공기유동과 유사한 분포를 보여준다. 텀블강도가 작은 경우에는 넓은 범위에 분포하며, 텀블강도가 큰 case 6의 경우 연소실 중앙측에 집중적으로 분포함을 알 수 있다.

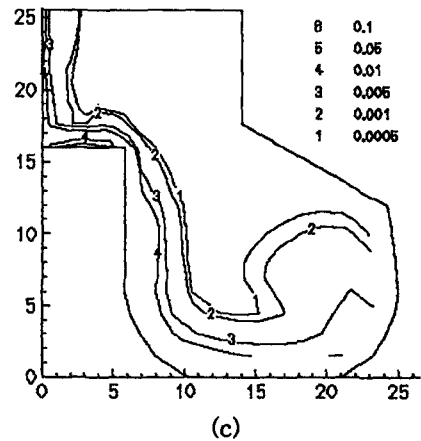
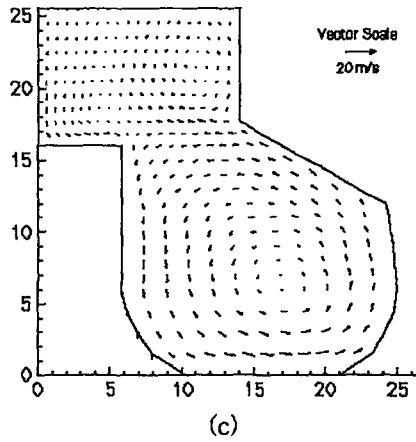
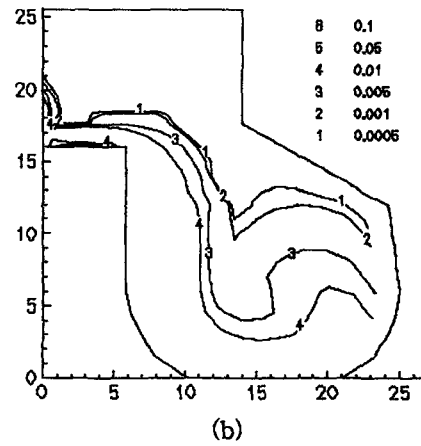
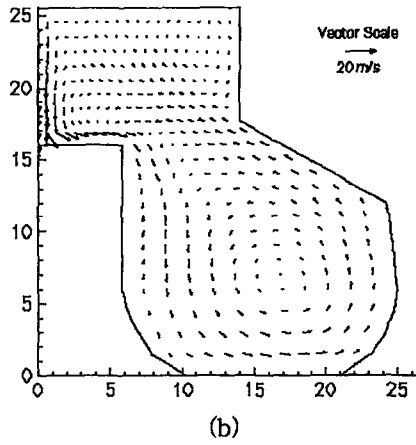
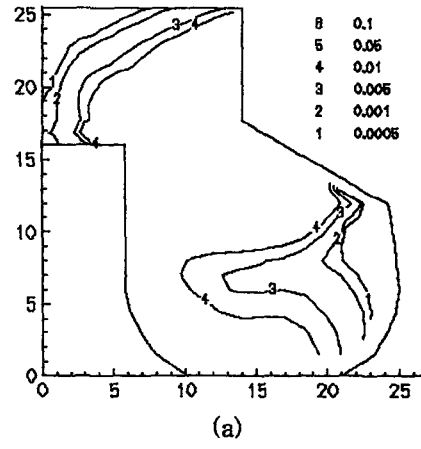
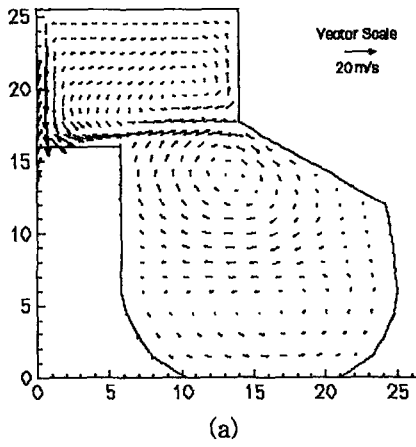


Fig.5 Comparison of Gas Flows with Trap Pressure Variation :
(a) 0.6MPa, (b) 1.8MPa, (c) 4.5MPa

Fig.6 Comparison of fuel vapor mass fraction(FVMF) with trap pressure variation :
(a) 0.6MPa, (b) 1.8MPa, (c) 4.5MPa

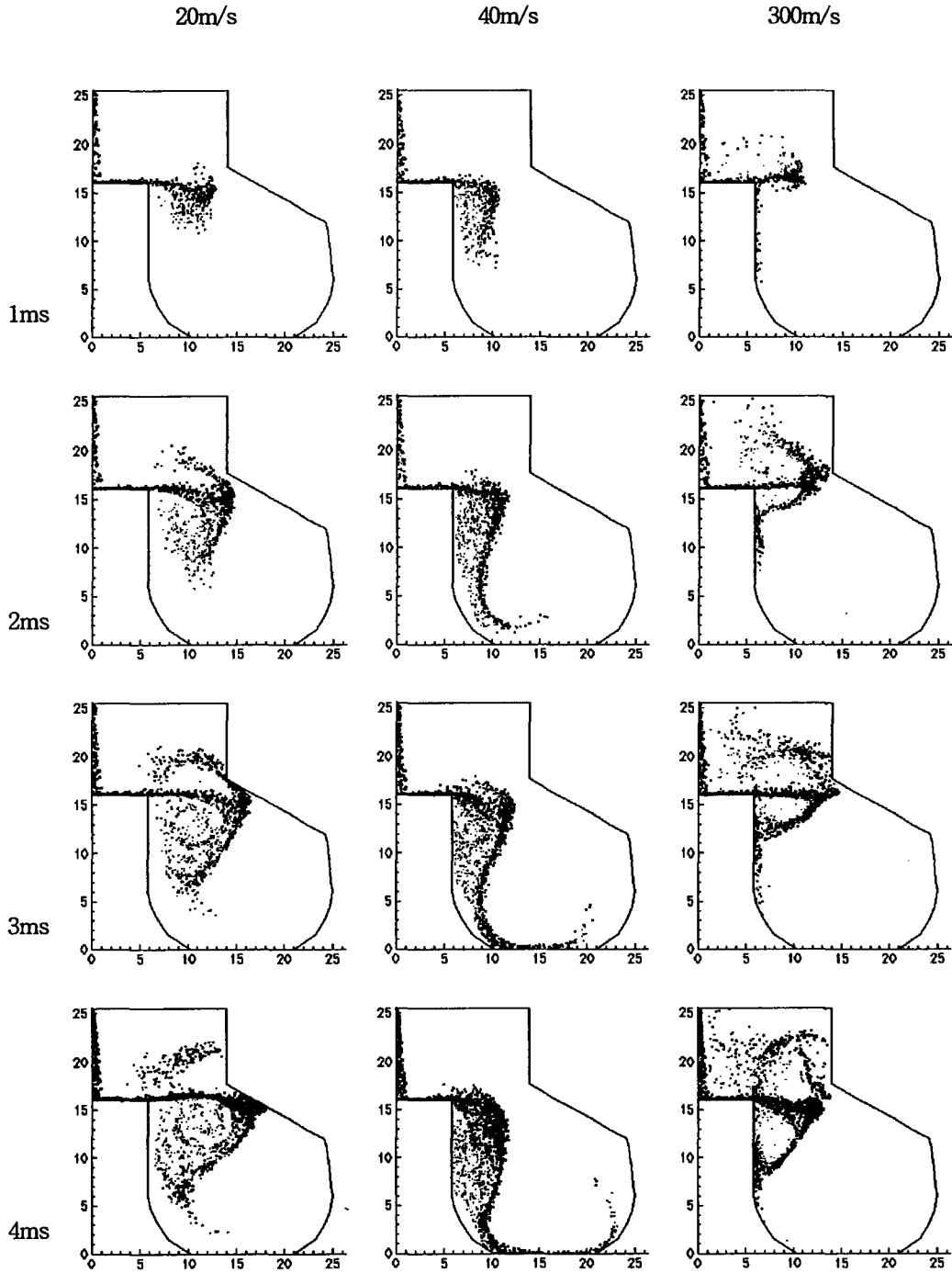


Fig.7 Spray Development with Tumble Velocity Variation

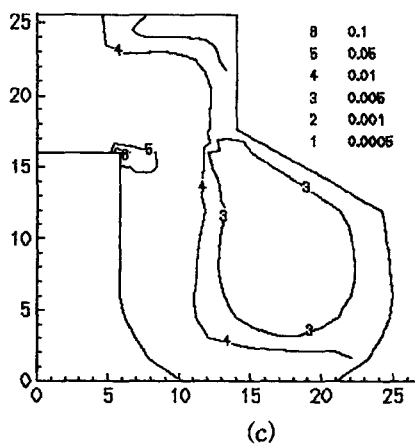
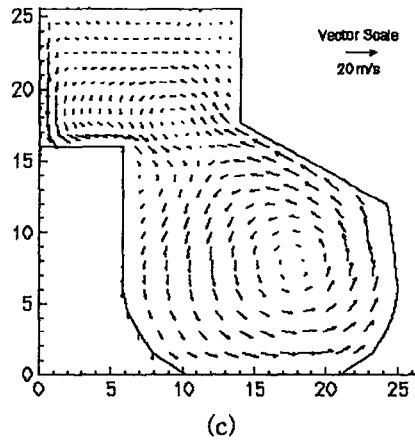
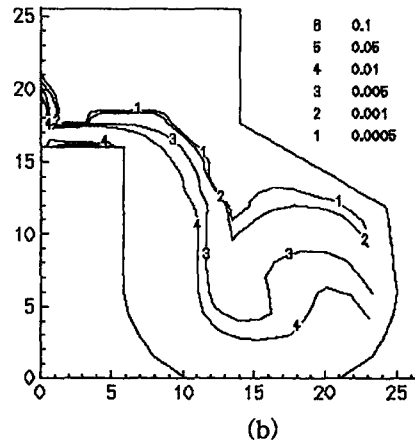
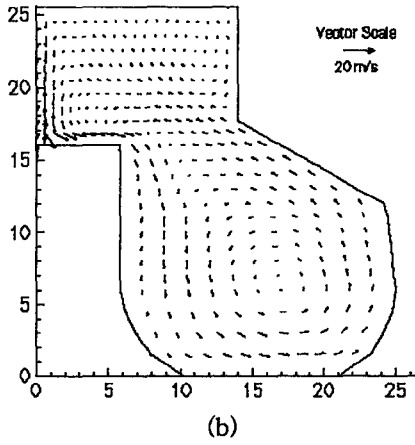
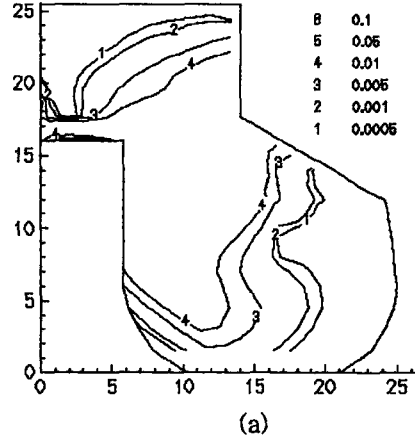
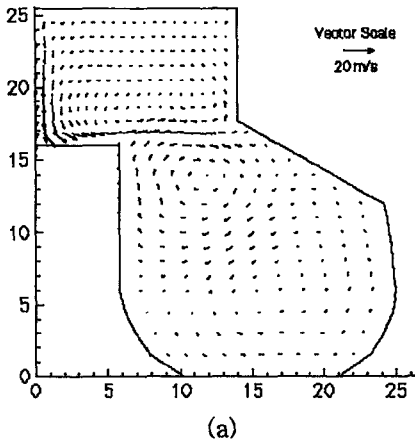


Fig.8 Comparison of gas flows with max. tumble velocity variation :
 (a) 20m/s, (b) 40m/s, (c) 300m/s

Fig.9 Comparison of FVMF with max. tumble velocity variation :
 (a) 20m/s, (b) 40m/s, (c) 300m/s

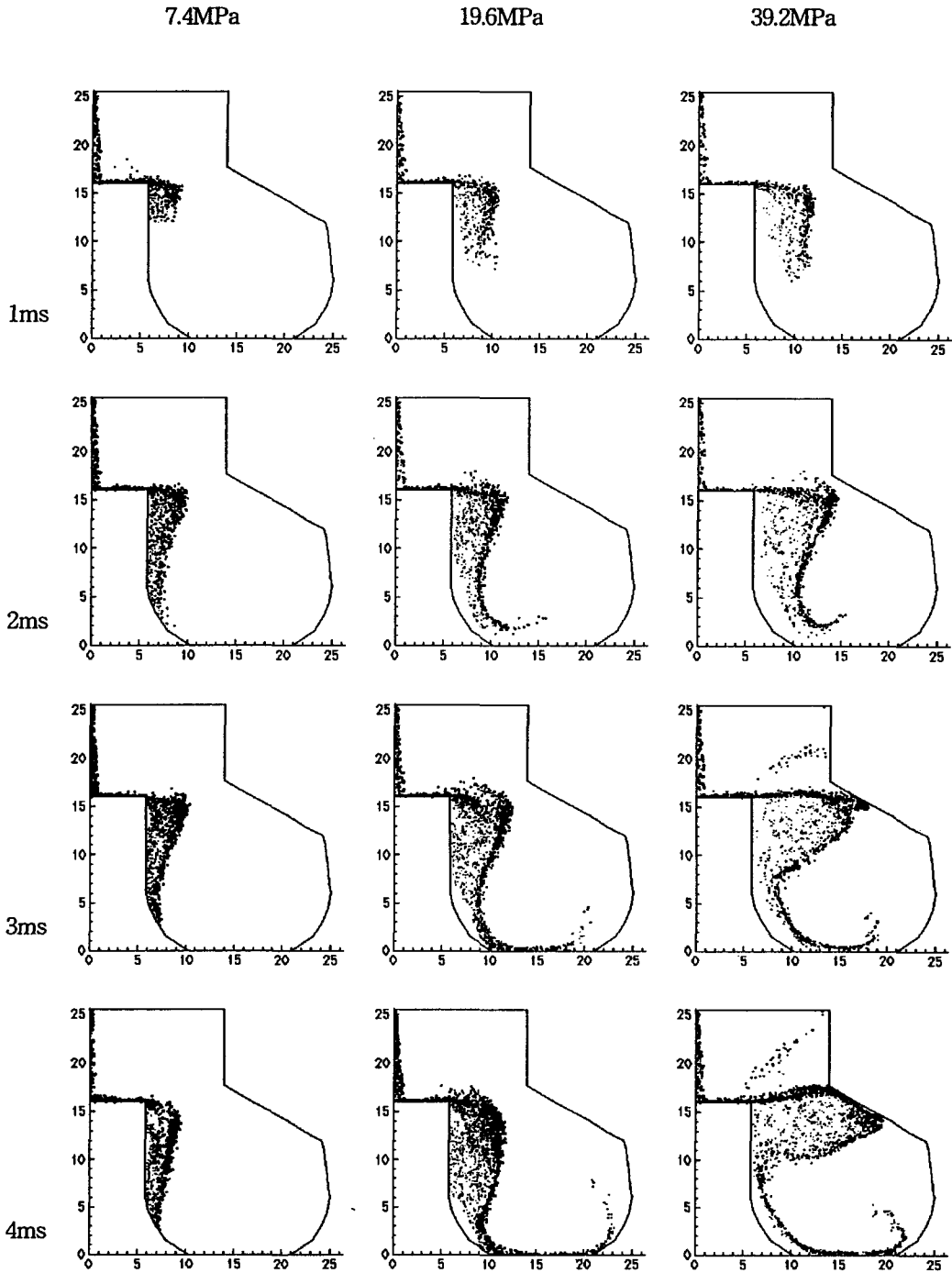


Fig.10 Spray Development with Injection Pressure Variation

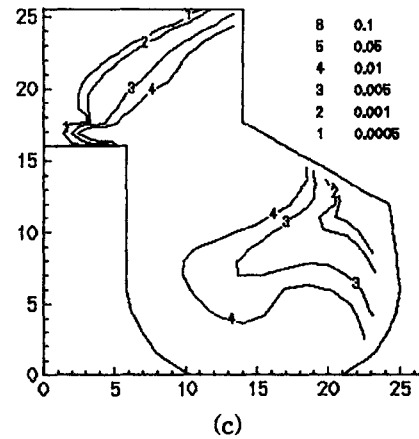
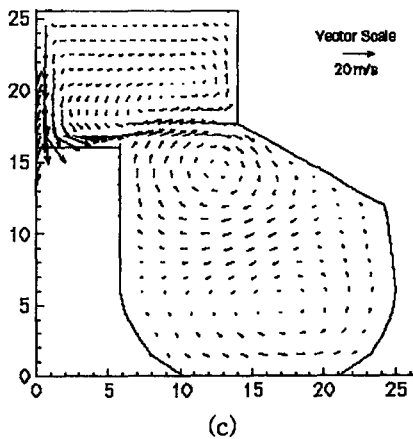
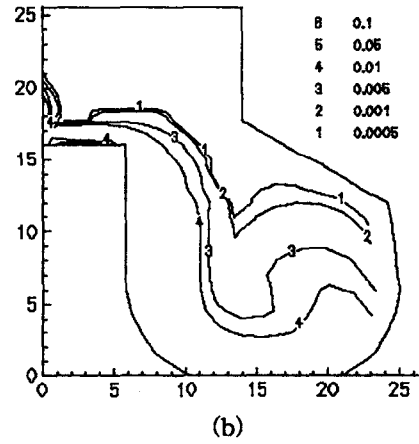
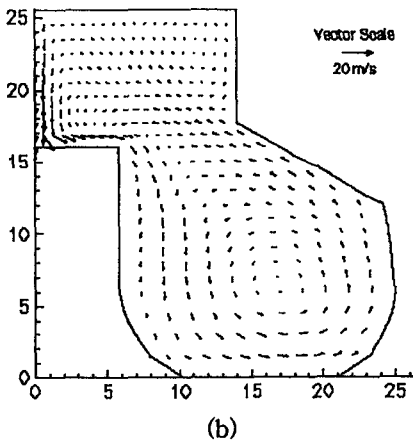
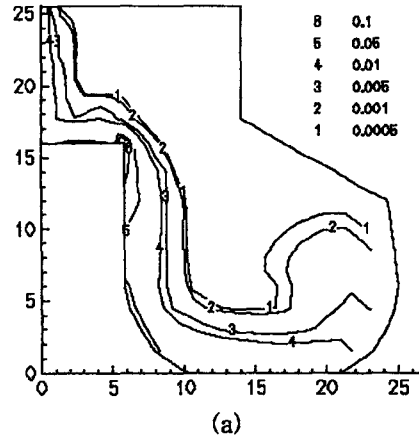
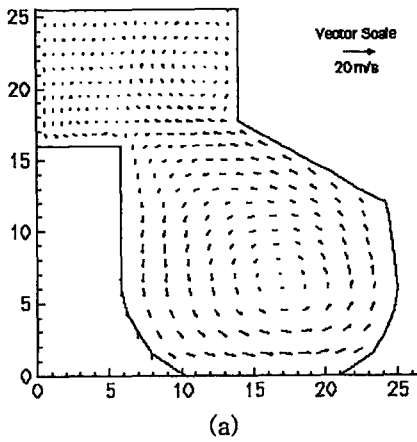


Fig.11 Comparison of gas flows with injection pressure variation :
 (a) 7.4MPa, (b) 19.6MPa, (c) 39.2MPa

Fig.12 Comparison of FVMF with injection pressure variation :
 (a) 7.4MPa, (b) 19.6MPa, (c) 39.2MPa

6. 분사압력 효과

Cases 7-9는 다른 조건들을 동일하게 유지하면서 분사압력을 7.4에서 39.2MPa까지 변화시키는 경우이다. Fig.10은 분사압력변화에 따른 액적거동을 시간의 진행과 함께 비교하였다. 분사압력이 작은 경우, Case7, 주위공기압이 큰 경우와 유사하게 충돌면을 따르는 분무거동을 보여준다. 분무압이 증가함에 따라 분무선단이 연소실 외벽에 충돌하게 되며 텀블유동과 함께 액적들이 충돌면 아래로 길게 분포한다.

Fig.11은 4ms에서의 공기유동을 나타낸다. 상기의 분무유동과 유사함을 알 수 있는데, 분사압 7.4에서는 텀블유동의 영향으로 분무가 충돌면에서부터 실린더 하부로 흐르고 있으며, 분사압이 39.2로 높은 경우에는 분무로 인한 유동 유입이 일어나고 분무로부터 거리가 떨어진 실린더하부는 텀블유동의 영향이 남아 2차충돌 후의 유동을 벽면주위로 돌리고 있음을 알 수 있다.

Fig.12는 4ms에서의 증발연료농도를 나타낸다. 역시 분무 및 공기유동과 유사한 분포를 보여준다. 분사압 7.4에서는 충돌면과 실린더벽면에 낮게 분포하고 있으며, 분사압이 높아질수록 실린더 전체에 널리 분포함을 알 수 있다.

7. 결론

연소실 중앙에 충돌면을 가지고 있는 신형식 엔진에 대한 결과검토로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 주위공기압력이 작은 경우 중앙 들출부에 충돌된 분무가 다시 연소실외벽에 충돌됨으로서 외벽부근의 액적분포농도를 높임으로서 벽면퇴적에 의한 연소효율저하가 우려되며, 한편 주위공기의 압력이 높은 경우 충돌분무가 연소실 중심으로 넓게 퍼져나가지 못하고 중앙 충돌부의 벽면을 타고 흐르는 거동을 보여줌으로서 역시 불완전연소에 의한 배기배출을 증가시킬 것으로 사료된다.

(2) 텀블강도가 약한 경우, 주위공기압력이 낮은 경우와 유사하게 연소실 외벽에 2차 충돌

을 보여주는 데, 더욱 좋지 않은 것은 2차 충돌 후 액적이 멀리 나가지 못하고 다시 벽면 부근으로 되돌아 오고 있기 때문에 더욱 연소에 좋지 못한 영향을 미친다. 한편 텀블유동이 너무 심한 경우 연소실 아랫면으로부터 역텀블이 강하게 발생함으로써 액적들이 연소실에 고루 분포되지 못하고 연소실 상부에 집중되는 거동을 보여준다.

(3) 분사압력이 작은 경우 중앙들출부에 충돌한 액적들이 충분히 퍼지지 못하고 충돌벽면을 타고 흘러내리게 되며, 너무 높은 경우 연소실 외벽에 2차충돌과 함께 충돌면 아래에만 연료가 분포함으로써 충분한 연소효율을 주지 못할 것이다.

연소실 중앙의 들출부에 분사연료를 충돌시켜 액적을 분쇄시킴으로서 평균액적의 크기를 적게하고, 분쇄액적들에 의한 공기유동강도를 높임으로서 연료가 잘 섞이고 증발을 충분히 시켜 연소효율 향상과 배기저감을 추구하고자 하는 신형식 연소실에서는, 상기 요약결과를 복합적으로 고려하여야 할 것이며 분무조건이 적절하지 않은 경우 역효과를 가져올 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Kroeger, C.A., "A neat methanol direct injection combustion system for heavy duty applications", SAE 861169 (1986).
- [2] Kato, S. and Onishi, S., "Stratified charge methanol engine by impingement of fuel jet", Pro. of 8th Int. Symp. on Alcohol fuels, (1988), p.513.
- [3] Kato, S. and Onishi, S., "New type of diesel engine by impingement of fuel jet(OSKA-D)", SAE 901618, (1990).
- [4] Park, K., Wang, D.M. and Watkins, A.P., "A contribution to the design of a novel direct injection diesel engine combustion system-analysis of pip size", Appl. Math. Modelling, (1993), vol 17, pp.114-124.

[5] Park, K. and Watkins, A.P., "An investigation of combustion chamber shapes for small automotive direct injection diesel engines employing spray impaction", IMechE Journal of Automobile Engineering, (1996), vol 210, pp.261-272.

[6] 박권하, "디젤분무의 새로운 벽면충돌모델", 한국전산유체공학회지 제1권 2호(Coupled paper).

[7] 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).

[8] 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.

[9] 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.