

## 분무충돌을 이용한 w-형 직접분사식 디젤연소실에 대한 계산적 고찰

Simulative consideration for w-shaped d.i. diesel combustion chamber  
system using spray wall impaction

박 권 하\*

K. Park

### ABSTRACT

Combustion chamber systems using spray impinged on walls have been studied for improving combustion characteristics in high speed direct injection diesel engines. The fuel spray injected in a small combustion chamber may be easily impinged and deposited on the wall. The fuel deposit has been considered as the cause for unburned emission due to difficulty of fuel-air mixing.

In this paper w-shaped combustion chamber which has four raised pips on the side wall is introduced and discussed by comparing with conventional chamber with no pips. The computer code employing new spray-wall interaction model in general non-orthogonal grids is used in here. The model is applied into the new chamber shape with raised pips. In this chamber system four-hole nozzle is used, and the sprays injected from the each hole impact on lands raised from the chamber wall surface. After impacting, the sprays break up into much smaller drops and distribute over all the chamber space, instead of distributing just near the wall surface in conventional omega-shape.

The results showed the potential of the w-shaped chamber employing pips for dispersing droplets so as to avoid the fuel deposit regions.

주요기술용어 : Spray Wall Impaction(분무벽면충돌), Combustion Chamber(연소실), Diesel Engine(디젤기관)

#### 1. 서론

대도시를 중심으로 문제가 심화되고 있는 대기오염 및 지구온난화의 주요인이 되는 CO<sub>2</sub>는 많은 부분이 자동차의 배출물에 기인하고

있다. CO<sub>2</sub> 저감을 위한 유일한 대책은 화석연료의 사용을 줄이는 것임으로 고효율 동력원의 개발이 절실히 요구되고 있다. 따라서 디젤기관도 소형화되고 고속화되고 있다.

디젤기관은 가솔린기관과 달리 고온고압의 연소실내에 연료를 분사함으로써 동력을 얻게 된다. 분사된 연료는 일정기간동안 연소실을

\* 한국기계연구원 동력시스템연구부

가로질러 이동된 후 착화가 시작된다. 디젤기관이 소형화되고 분사압력이 높아짐에 따라 착화지연기간 동안 연소실벽면에 퇴적되는 연료량 역시 증가되며, 이는 주위공기와 연료의 혼합을 억제하게 되고, 미연가스의 증가와 함께 연소효율을 저감하게 된다. 이러한 소형고속디젤엔진의 연료퇴적현상을 피하기 위해서 분무충돌을 이용하는 연소실이 연구되고 있다.

Kato와 Onishi<sup>(1,2,3)</sup>는 단공노즐에서 분사되는 연료를 충돌시켜 연소특성을 향상시키는 연구를 하고 있다. 노즐을 실린더헤드의 중앙에 위치시키고 충돌부를 연소실의 중앙부에 마련함으로써 연소실 아래로 분사된 연료가 준비된 면에 충돌되도록 하였다. 충돌된 액적들은 작은 액적들로 분쇄되면서 충돌면 밖으로 퍼져나간다. 이 액적들은 압축과정과 함께 피스톤 상부로부터 유입되는 스퀴시유동에 의하여 연소실 내부에 널리 퍼지게 된다. 그들은 결과로서 질소산화물과 매연미립자의 저감을 발표하였다.

Ogura와 Lin<sup>(4)</sup>은 실린더헤드에 충돌부를 부착하였으며, 분사된 연료가 이곳에 충돌하여 연소실내부로 넓게 퍼질 수 있도록 하였다. 그들은 여러 형상의 충돌부를 실험하였다.

박과 Watkins<sup>(5,6,7,8)</sup>는 피스톤보울에 5개의 충돌부를 가지고 있는 연소실을 제시하고, 액적의 충돌특성을 해석하기 위하여 개별액적에 대한 실험결과들<sup>(9,10,11)</sup>을 근거로 하여 디젤분무의 충돌거동에 알맞는 새로운 분무충돌모델을 개발하였으며, 이를 이용하여 연소실의 연소특성을 분석하였다. 5개의 분공으로부터 분사된 연료는 연소실벽면에 부착된 돌출부에 충돌하여 분쇄되고 연소실의 자유공간으로 넓게 퍼져나간다. 결과적으로 분무의 충돌을 이용하는 연소실은 소형디젤기관에서 연소효율의 향상에 기여할 것으로 설명하고 있다.

상기에서 제시된 연소실들<sup>(1,2,3,4)</sup>은 충돌면 부착부위의 내구성문제로, 박과 Watkins<sup>(6,8)</sup>에 의한 연소실은 분사기 중앙에 분공을 가지고 있기 때문에 실제엔진에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있는 w-형 연소실에서 충돌분무를

이용하는 연구를 하고자 한다. 박 등<sup>(12)</sup>은 실험에 의하여 이러한 연소실설계를 위한 충돌면의 크기를 분석하였으며 폭6mm 정도가 적당한 것으로 발표하였으며, 본 연구에서는 충돌면 설계를 위하여 단순 형상에서의 충돌면 분석하고 폭6mm 크기의 충돌면을 갖는 w-형 연소실을 제시하고 평가하고자 한다.

## 2. 수학적모델

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( $\xi^i$ )로 변형된 기상의 전달방정식은 다음과 같이 일반텐서표시법과 함께 표현된다.

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

여기에서  $U^i$ 는 격자면의 수직유동항,  $u^j$ 는 속도벡터  $\vec{V}$ 의 직교좌표성분이며,  $P_{ij}$ 는 면적벡터의 직교좌표성분이다.

벽면충돌모델은 개별액적의 실험결과(Araki와 Moriyama<sup>(9)</sup>, Jayaraine과 Mason<sup>(10)</sup>, Wachters와 Westerling<sup>(11)</sup>)에 기본을 두고 있다. 이들 실험은 충돌후 액적이 충돌면과 수직방향과 수평방향으로 나뉘어 거동됨을 보여주고 있으며, 역시 충돌전 액적의 웨버넘버에 의존함을 보여준다. 이 모델은 박과 Watkins<sup>(7)</sup>에 의하여 상세하게 설명되어 있다. 충돌모델은

다음과 같이 요약된다.

$We < 80$ 인 경우;

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

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

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

$We > 80$ 인 경우;

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

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

$$D_{da} = \frac{D_{db}}{N^{\frac{1}{3}}} \quad (7)$$

### 3. 계산 조건

Table 1은 충돌면 위치와 형상변화에 의한 분무특성을 해석하기 위한 조건을 보여 준다. 조건1-4는 노즐과 충돌면의 거리변화에 대한 특성을, 조건5는 경사면충돌에 대한 특성을 그리고 조건6-7은 원형벽면에서의 분무특성을 분석하기 위한 조건이다. 분사조건은 대상 실험 엔진에 사용되는 분사기에 대한 것으로, Fig. 1은 관로압력과 니들양정의 변화특성을, Fig. 2는 분사율의 시간에 따른 변화특성을 나타낸다.

Table 1 Test cases

Test cases	1	2	3	4	5	6	7
Wall shape	Flat	Flat	Flat	Flat	Flat	Circle	Circle + Pin
Wall distance(mm)	5	10	15	20	15	18	16
Air temperature(K)	room	room	room	room	room	room	room
Air pressure(MPa)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Inj. angle (°)	0	0	0	0	15	-	-

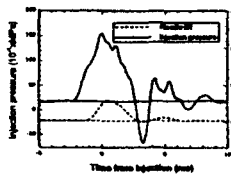


Fig. 1 Line pressure

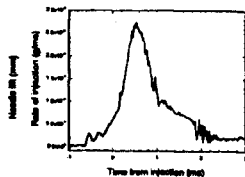


Fig.2 Injection rate

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 수직충돌특성

Fig.3은 거리변화에 따른 충돌면 특성을 분석하기 위한 계산격자를 보여 준다.  $23 \times 33$  격자를 이용하였으며 격자가 유동을 따르도록 함으로서 계산오차를 최소화하였다.

Fig.4는 연소가 시작될 것으로 예상되는 분사후 1.0msec에서의 액적분포를 보여준다. 충돌면 거리가 5mm인 경우, 충돌면에 충돌된 액적들은 다른 어떠한 경우 보다 빠른 속도로 충돌면을 떠나게 되지만 반경방향으로의 진행거리는 10mm인 경우와 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 충돌분무에 의하여 발생된 기체유동이 가까이에 위치한 분사노즐쪽으로 역류됨으로서 충돌분무를 밖으로 퍼지게 하려는 운동량을 약화시키면서 위쪽으로 퍼지게 하는 영향을 미치기 때문으로 생각된다. 충돌면의 거리가 증가하면서 상하방향으로 넓게 퍼짐을 보여 주며 반경방향으로는 감소되는 것을 알 수 있다. Fig.5, 6은 분무의 증발분과 기체유동을 보여 준다. 분무의 거동과 유사한 특성을 보여준다. 기체의 유동은 액적들의 유동에 의하여 발생되며 주위 벽면의 영향을 받아 변화된다. 충돌거리 5mm인 경우 충돌분무에 의하여 발생된 유동이 상부 벽면 쪽으로 더 강한 소용돌이 유동을 갖으면서 반경방향으로 진행하며, 20mm인 경우에는 반대로 하부 벽면쪽으로 강한 유동을 갖는다.

#### 4.2 경사면 충돌특성

경사면 충돌특성을 해석하기 위하여 충돌거리 15mm인 수직충돌면을 경사지게 수정하여 격자를 생성하였으며, 수직충돌의 경우와 동일한 격자밀도를 갖는  $23 \times 33$  격자를 이용하였다.(Fig.7)

Fig. 8-10은 수직충돌과 비교된 경사면충돌에 대한 액적, 증발분 및 유동 분포를 보여 준다. 수직충돌면에 충돌한 액적들은 충돌면과 수평한 방향으로 퍼져나감을 보여 주지만, 경사면에 충돌한 액적들은 전체적으로 상부로 휘

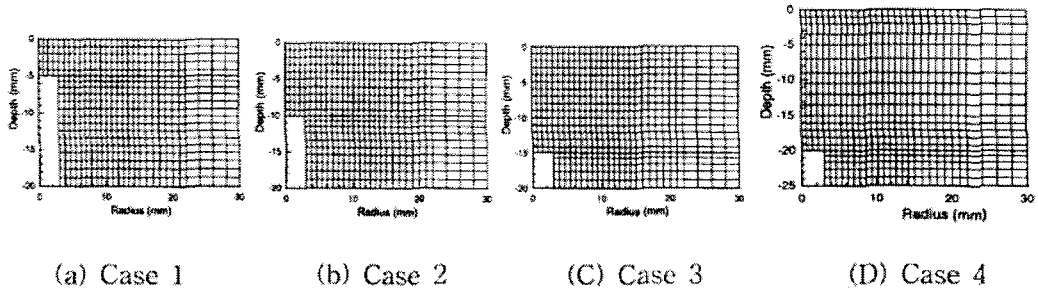


Fig. 3 Grids for normal impact

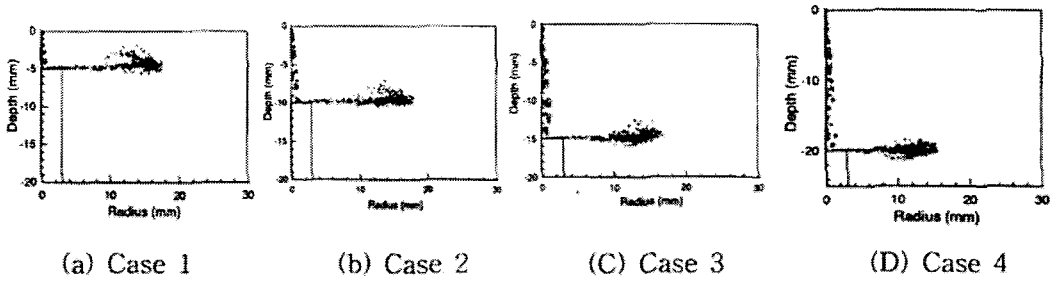


Fig. 4 Sprays for normal impact

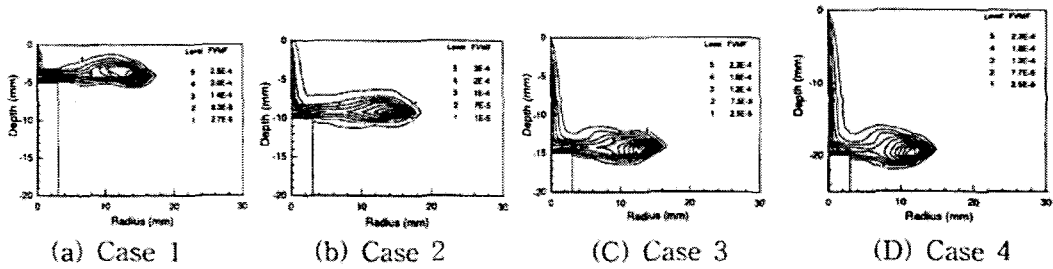


Fig. 5 Fuel vapour contours for normal impact

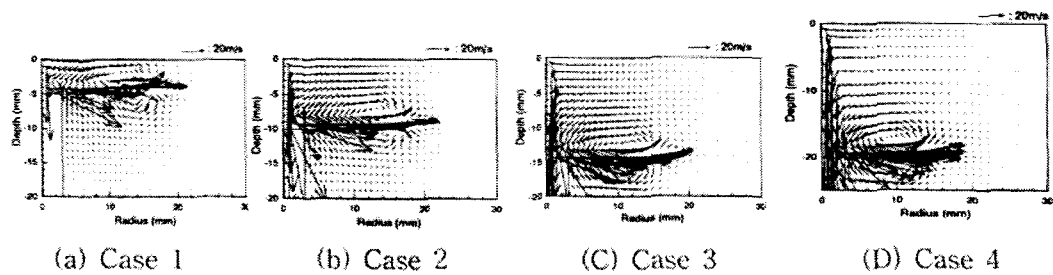
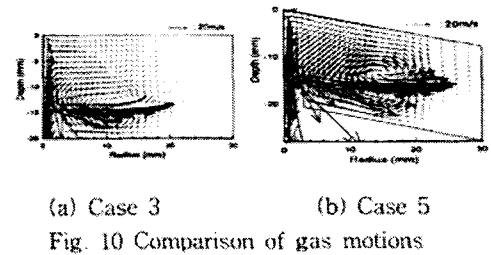
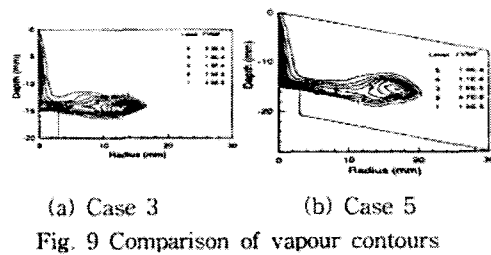
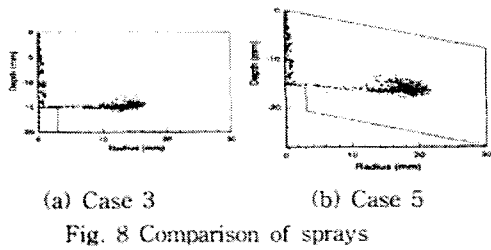
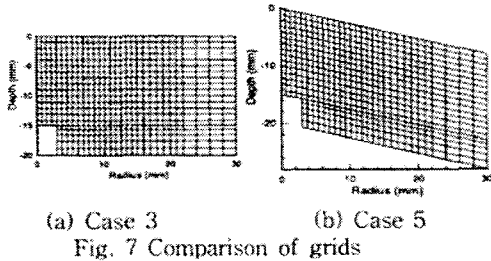


Fig. 6 Gas motions for normal impact



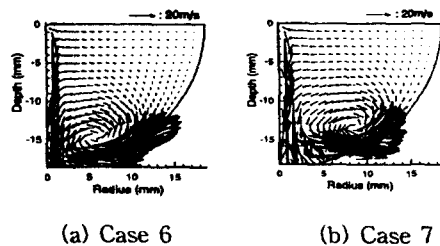
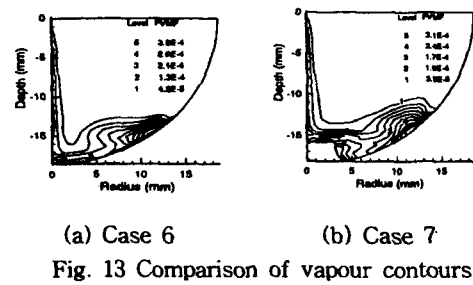
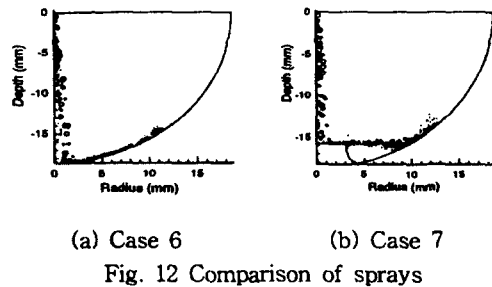
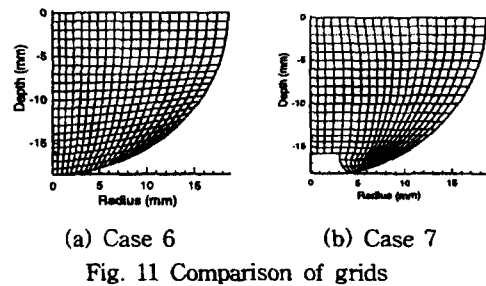
어지면서 더 넓게, 멀리 퍼져나감을 알 수 있다. 이는 Wachters 등<sup>(11)</sup>의 실험에서 보여 주는 것 처럼 액적이 수직충돌면에 충돌하는 경우에는 대부분의 운동에너지를 충돌현상과 함께 손실하지만 경사면 충돌의 경우 경사각만큼 에너지 손실이 감소하기 때문에 사료된다.

### 4.3 원형벽면 충돌특성

원형벽면에 대한 23×23격자는 Fig. 11에 보여 준다. 중앙에 충돌부가 있는 경우에 대하여 격자를 한 번에 생성하면, 격자가 경계면을 따라서 생성되기 때문에 충돌면 외곽에서 큰계산 오차를 발생할 수 있다(박과 Watkins<sup>(13)</sup>). 따라서 여기에서는 충돌면을 기준으로 상하로 영역

을 나누어 생성하였다.

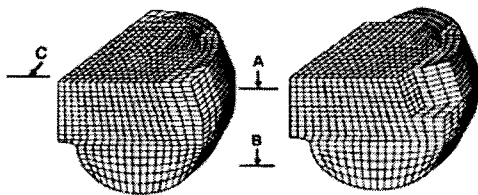
충돌면이 없는 원형내벽에 충돌된 액적들은 벽면 밖으로 확산되지 못하고 벽면에 퇴적되는 현상을 보여 주지만, 충돌면이 있는 경우에는 충돌면에 충돌된 액적들이 옆벽면에 2차 충돌되고 있음에도 불구하고 넓게 퍼져나감을 알 수 있다. 이는 Fig. 12에서 보여주며, 유사한 분포특성을 나타내는 증발연료와 유동분포는 Fig. 13-14에서 보여 준다.



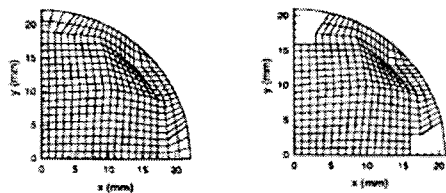
5. w-형 연소실 분석

5.1 계산조건

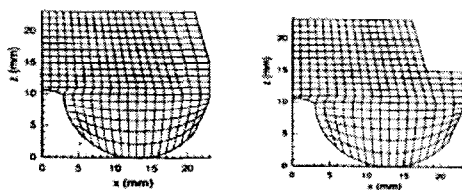
분무충들을 이용하는 연소실을 설계함에 있어, 용량이 1500cc 4기통 엔진의 연소실 크기를 대상으로 하였으며, 상기 분석결과를 참조하여 충돌부의 크기와 위치를 설정한다. 피스톤보울은 w-형을 하고 있으며 중앙에 13mm 높이의 돌출부를 가지고 있다. 최대크기는 46mm×23mm이며 그 중앙에 좌우대칭인 4공 노즐을 위치시킨다(Fig. 15(a)).



(a) Case with no-pip (b) Case with pips  
Fig. 15 Grids used for simulations



(a) Sec. A(no-pip) (b) Sec. A(pips)



(c) Sec. C(no-pip) (d) Sec. C(pips)

Fig. 16 Sectional views of the grids

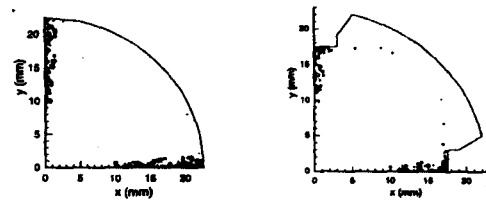
Fig. 15(b)는 신형식연소실을 보여주는 데, 대상 연소실에서 분사된 분무가 미치게 되는 위치에 충돌부를 마련함으로써 액적을 분쇄시키고 분무의 방향을 보울 아래로 향하게 하여 액적의 퇴적현상을 방지하도록 설계하였다. 충돌부의 폭은 6mm로 하고, 분무액적분포를 보울하부로 향하도록 경사지게 하였다. 22×22×

22격자를 사용하였으며, 주요 단면에서의 격자는 Fig. 16에 나타낸다.

w-형 연소실에서 충돌면이 있는 경우와 없는 경우를 비교분석하기 위한 계산조건은 Table 3과 같다.

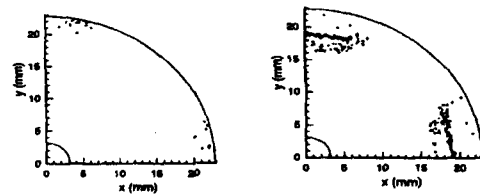
Table 3 Simulation conditions

Cases	w-shape with pips	w-shape with no pips
Number of pips	4	-
Pip distance (mm)	17	-
Pip width (mm)	6	-
Gas pressure (MPa)	1.5	1.5
Gas temperature (K)	773	773



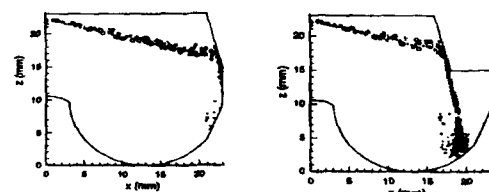
(a) Sec. A(no-pip) (b) Sec. A(pips)

Fig. 17 Sectional views of sprays



(a) Sec. B(no-pip) (b) Sec. B(pips)

Fig. 18 Sectional views of sprays



(a) Sec. C(no-pip) (b) Sec. C(pips)

Fig. 19 Sectional views of sprays

5.2 분무특성

Fig. 17은 충돌면을 수평으로 가로지르는 단면(Section A)에 대한 분사후 1.0msec에서의

분무특성을 보여준다. 충돌면이 없는 경우 충돌된 액적들이 충돌된 위치에 거의 퇴적됨을 보여준다. 충돌면이 있는 경우에도 많은 액적들은 좌우퍼짐없이 충돌위치에 있는 것을 나타내지만 몇 개의 액적들은 넓게 분포되어 가는 것을 알 수 있다. 충돌된 액적들이 주로 퍼져나가는 충돌면 아래 단면(Section B)에 대한 액적분포는 Fig. 18에서 보여 준다. 충돌부름가지고 있는 연소실에서는 액적들이 넓게 분포됨을 보여주며, 특히 벽면과 멀리 있음을 알 수 있다. 반면 충돌면이 없는 경우에는 액적들이 벽면근처에 소량분포하고 있음을 보여 준다. Fig. 19는 충돌면 중앙을 가로지르는 수직 단면(Section C)에서의 분무특성을 보여 준다. 충돌면이 분사방향과 경사지게 위치하기 때문에 충돌된 액적들은 대부분 충돌부 아래 방향으로 진행되는 것을 알 수 있다. 충돌면이 없는 경우에는 충돌된 액적들의 대부분이 충돌된 벽면에 퇴적됨을 보여주며 소량의 액적들만이 보울 아래쪽으로 퍼지고 있다. 충돌면이 있는 경우, 충돌면에 충돌된 액적들이 피스톤보울 아래로 넓게 퍼져나감을 보여주며 분무의 끝부분은 안쪽으로 분산됨을 알 수 있다.

5.3 분무중발특성

Fig. 20, 21, 22는 수평, 수직단면들(Section A, B, C)에서의 연료중발분포를 보여 준다. 액적들의 분포 경향과 유사함을 알 수 있다. 충돌면을 갖은 연소실의 경우에는 중발연료가 연소실 내부에 넓게 분포됨을 보여주지만, 충돌면이 없는 경우에는 벽면주위에만 좁게 분포됨을 알 수 있다.

5.4 기체운동특성

Fig. 23, 24, 25는 역시 수평, 수직단면들(Section A, B, C)에서의 기체유동을 보여 준다. 충돌면이 없는 경우에는 유동이 벽면주변에서만 발생됨을 보여주지만, 충돌면이 있는 경우 각 충돌면을 중심으로 수많은 소용돌이 유동이 발생됨을 알 수 있다. 이 들 소용돌이 유동은 충돌액적들이 충돌부밖으로 이동할 때

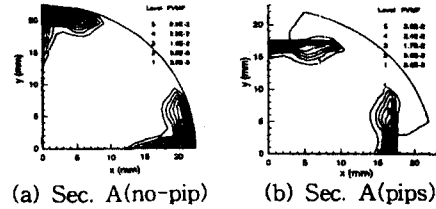


Fig. 20 Sectional views of sprays

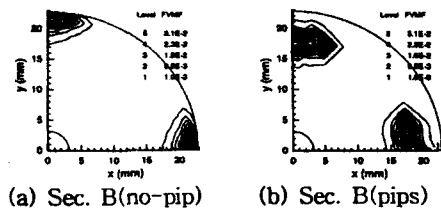


Fig. 21 Sectional views of vapour contours

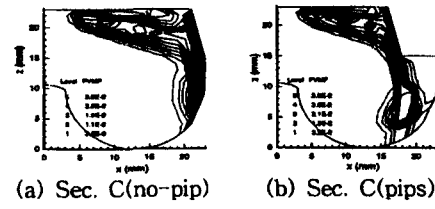


Fig. 22 Sectional views of vapour contours

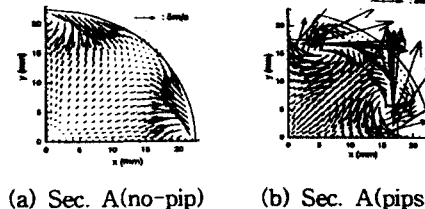


Fig. 23 Sectional views of gas motions

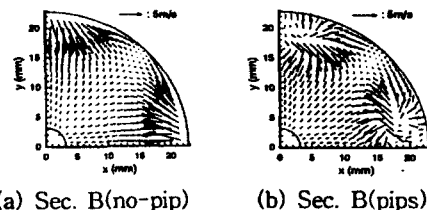


Fig. 24 Sectional views of gas motions

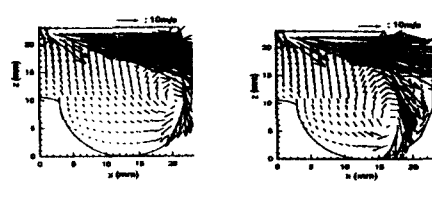


Fig. 25 Sectional views of gas motions

분무몸체에서 액적들을 분산시키는 역할을 하며 동시에 증발분을 넓게 분포시키는 역할을 한다.

## 6. 결론

여러 가지 충돌면을 분석하고, w-형 연소실을 분석한 본 연구는 다음과 같이 요약된다.

(1) 수직충돌면 거리를 분석한 결과로서, 분무거리의 증가에 따른 반경방향 퍼짐의 감소와 상하방향 퍼짐의 증가를 보여 주었으며, 분무선단은 가까운 벽면방향으로 분산됨을 나타내었다.

(2) 경사면에 충돌한 액적 및 증발연료는 수직충돌의 경우에서 보다 더욱 넓게 분포됨을 보여 주었다.

(3) 원형내부면에 충돌하는 경우 충돌면이 없으면 액적과 증발분이 벽면근처에만 분포됨을 보여주는 반면 충돌면이 있는 경우 벽면으로부터 멀리 분산됨을 알 수 있었다.

(4) 충돌면을 갖고 있는 w-형연소실의 경우에서는 충돌면이 없는 경우와 비교할 때 연료의 퇴적현상을 줄일 수 있었으며, 충돌면 주변의 강한 소용돌이 유동의 영향으로 연료를 연소실내부에 넓게 분산시킴을 보여 주었다.

이상의 결과로 부터 분무의 벽면퇴적을 피할 수 없는 소형고속디젤엔진에서는 본 연구과 같은 분무충돌을 이용하는 연소실이 매우 효과적인 대책이라고 생각된다.

## 참 고 문 헌

(1) Kato, S. and Onishi, S., "New type of Diesel Engine by Impingement of Fuel Jet(OSKA-D)", SAE 901618, 1990.  
 (2) Kato, S. and Onishi, S., "Performance of Glow Plug Assisted Direct Injection Methanol Engine by Impingement of Fuel Jet(OSKA-F)", SAE 911769, 1991.  
 (3) Kato, S., Onishi, S., Tanabe, H. and Sato, G.T., "Development of low NO<sub>x</sub> Emission Diesel by Impingement of Fuel Jet", SAE 921645, 1992.

(4) Ogura, M. and Lin, B., "A New Multi-Impingement Wall Head Diffusion Combustion System (NICS-MH) of a D.I. Diesel Engine", SAE 940196, 1994.

(5) Park, K. and Watkins, A.P., "Comparison of wall spray impaction models with experimental data on drop velocities and sizes", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol.17 no.4, pp. 424-438, 1996.

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

(7) Park, K. and Watkins, A.P., "Assessment and application of a new spray wall impaction model", Transaction of Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines, IMech.E, pp. 1-10, 1996.

(8) 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, vol. 17, pp. 114-124, 1993.

(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, p.545, 1964.

(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, p.1047, 1966.

(12) Park, K., "Analysis of impingement lands to help diesel combustion chamber design using spray impaction", J. of ICLASS-Korea, Vol.1, No.2, pp. 24-32, 1996(in Korean).

(13) Park, K. and Watkins, A.P., "The effect of non-orthogonal grids on spray and air flow predictions", KSME Journal, vol. 10, no. 4, pp. 458-470, 1996. 12.