

충돌면 경사각도 변화에 따른 분무특성

Spray Characteristics Depending Upon Impaction Land Surface Angle Variations

김 재 휘*, 김 진 환**, 박 권 하***
C. H. Kim, J. H. Kim, K. Park

ABSTRACT

In a diesel engine the phenomenon of spray impaction on a combustion chamber wall has been taken as an undesirable matter because of the deposition of fuel on the surfaces, and the subsequent slow evaporation and mixing with air resulting in unburned hydrocarbons. Therefore many researches have concentrated on avoiding fuel impaction on surfaces.

On the contrary done a number of studies using spray wall impactions in a positive way, which makes the droplets smaller, changes the direction into free spaces far from the wall and also improves mixing with air.

In this paper the angle variations of the impaction land surface prepared for the injection spray is analysed as a simulative manner. The spray dispersions, vapor distributions and flow fields are compared with impacting angle variation. The results show more angle give more vapor distribution until 15°.

주요기술용어 : Spray(분무), Impaction Land Surface(충돌면), Angle Variation(경사각도 변화), Spray Wall Impaction(분무의 벽 충돌), Impaction Distance(분공과 충돌면 사이의 거리, 충돌거리), Ambient Pressure(주위 공기 압력)

기 호 설 명

\bar{A} : Area vector

D_d : Droplet diameter

* 정회원, 인천기능대학

** 동의대학교 기계공학과

*** 정회원, 한국해양대학교 기계공학부

D_{da} : Droplet diameter after impaction

D_{db} : Droplet diameter before impaction

\sqrt{g} : Jacobian determinant

N_d : Number of droplets

A^i : Cartesian components of area vector

U^i : Normal flux components

u^i : Cartesian components of velocity vector

q_{ij} : Geometric relations
 Γ : Diffusivity
 θ : Void fraction

1. 서 론

디젤기관의 혼합기와 오토기관의 혼합기를 비교할 때, 가장 큰 차이점은 균질 여부이다. 오토기관의 혼합기는 균질인데 반하여 디젤기관의 혼합기는 불균질 혼합기이다. 따라서 디젤기관에서의 연소는 전체적으로는 회박연소이지만 분사된 연료가 주위공기와 충분히 혼합되지 않은 상태에서 연소가 시작되고, 분무의 중심부에는 연소중에도 공기가 도달하지 못하여 매연의 발생과 함께 연비가 증가하게 된다. 그러므로 디젤기관에서는 “어떻게 하면 불균질 혼합기를 균질 혼합기에 근접시킬 수 있는가?” 하는 점에 초점을 맞추어 왔다.

혼합기의 질을 개선하는 방법으로 Kroeger¹⁾, Naber et al²⁾, Kato and Onish³⁾, Ogura et al⁴⁾ 등은 분무의 충돌을 이용한 연소실을 제안하였다. 또 Park et al^{5~7)}도 충돌을 이용한 새로운 연소실을 제안하고, 계속해서 주위 조건들, 예를 들면 충돌면의 크기, 분사압력, 분공의 크기, 연소실 공기의 압력과 온도 등을 계산을 통하여 분석하였다. 이들은 분사된 연료를 연소실내 돌출된 충돌면에 충돌시켜 분무액적을 작게 하고, 충돌된 액적이 연소실 내부표면에 쌓이지 않고 고루 퍼지게 하여, 균질 혼합기를 이용한 가솔린기관에서와 같은 효과를 얻고자 하였다.

본 연구에서는 그들이 다루지 않았던 충돌면의 경사각도가 분무의 특성에 미치는 영향을 수치해석하여, 충돌면을 갖는 연소실을 설계하는데 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 수학적 모델

계산에 적용한 수학적 모델은 많은 논문에서 언급하고 있다. 특히 Watkins⁸⁾, Khaleghi⁹⁾ 그리고 Park¹⁰⁾ 등은 2상(2 phase)에 대한 보존방정식, 상간의 상호작용, 액적분쇄 등에 대하여 자세히 설명하고 있으며, Park 등¹¹⁾은 실험결과와 비

교하여 모델의 정확도를 상세하게 증명하였다. 또 홍 등¹²⁾은 이들 내용을 개략적으로 다음과 같이 요약하였다.

가스상태에 대하여는 질량, 모멘텀, 에너지 및 증발연료에 대한 Eulerian 보존방정식과 $k-\epsilon$ 난류 모델을, 액적에 대하여는 Lagrangian 방정식을 적용하며, 기상과 액상의 상호작용은 생성항의 형태로 반영된다. 일반적인 비직교좌표계(ξ^i)에서의 상기 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

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

여기에서 normal flux components U^i 은

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

으로 나타나며, u^j 는 벡터필드 \bar{V} 의 Cartesian 성분이다. 그리고 P_{ij} 는 면적벡터의 직교좌표성분을 나타내며 다음과 같이 표시된다.

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

그리고 Jacobian Determinant $\sqrt{g} = |J|$ 은 다음과 같이 정의된다.

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

q_{ij} 는 기하학적 관계식으로

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

으로 주어지며, \bar{A}^i 은 면적벡터이다. 또한 S_{θ} 는 생성항을 나타낸다.

한편 분무의 벽면충돌모델은 여러 종류의 실험^{13,14)}에 근거하여 다음과 같이 주어진다.

$We < 80$ 인 경우에 대하여

$$\overline{V}_a^n = -\alpha \overline{V}_b^n \quad (12)$$

$$\overline{V}_a^t = \overline{V}_b^t \quad (13)$$

$$D_{da} = D_{db} \quad (14)$$

We > 80인 경우에 대하여

$$(\overline{V}_a^n)^1 = (\overline{V}_a^n)^2 = -\alpha \overline{V}_b^n R_{xx} \quad (15)$$

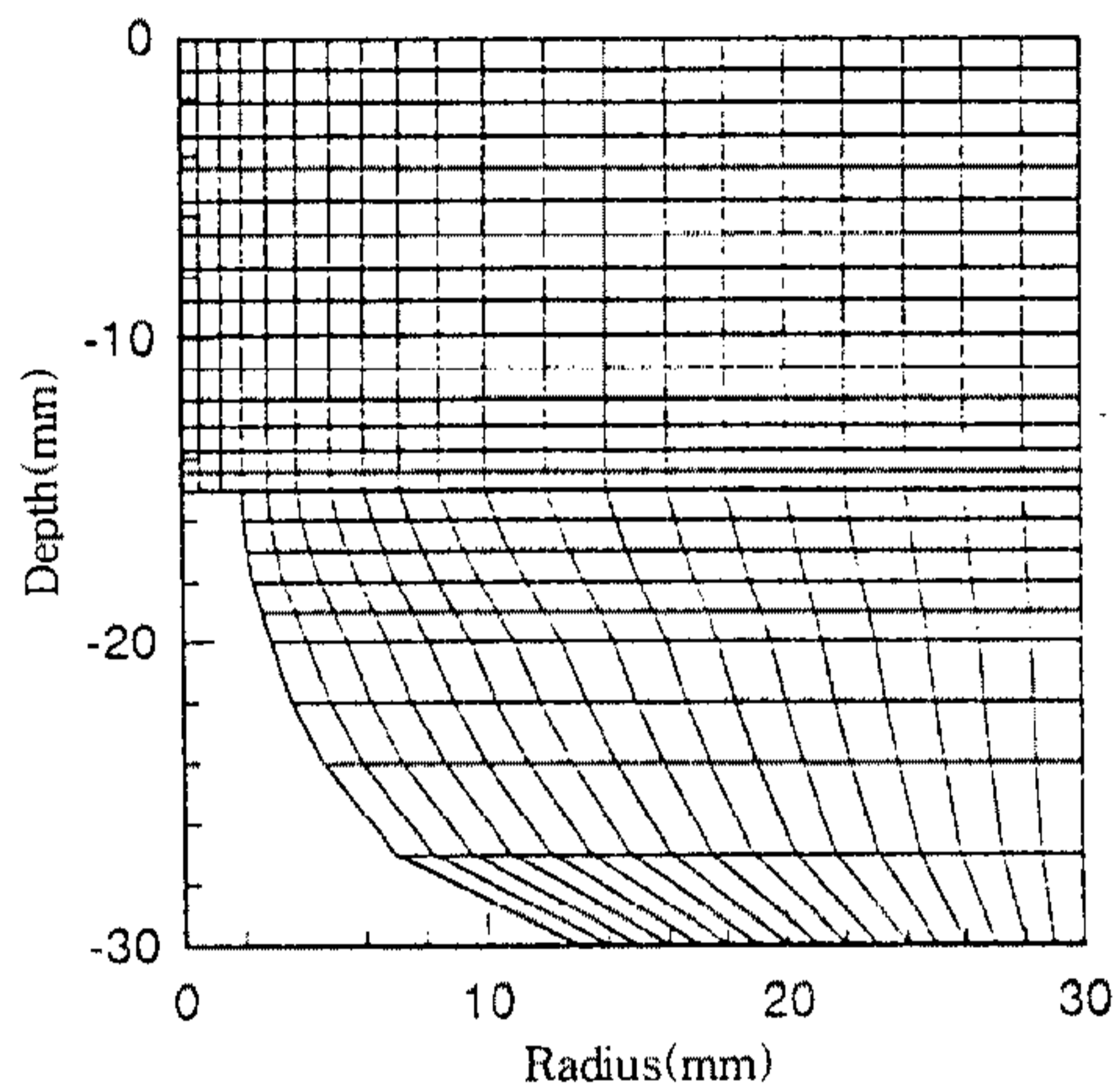
$$(\overline{V}_a^t)^1 = \overline{V}_b^t + \overline{V}^t_{scattering} \quad (16)$$

$$(\overline{V}_a^t)^2 = \overline{V}_b^t - \overline{V}^t_{scattering} \quad (17)$$

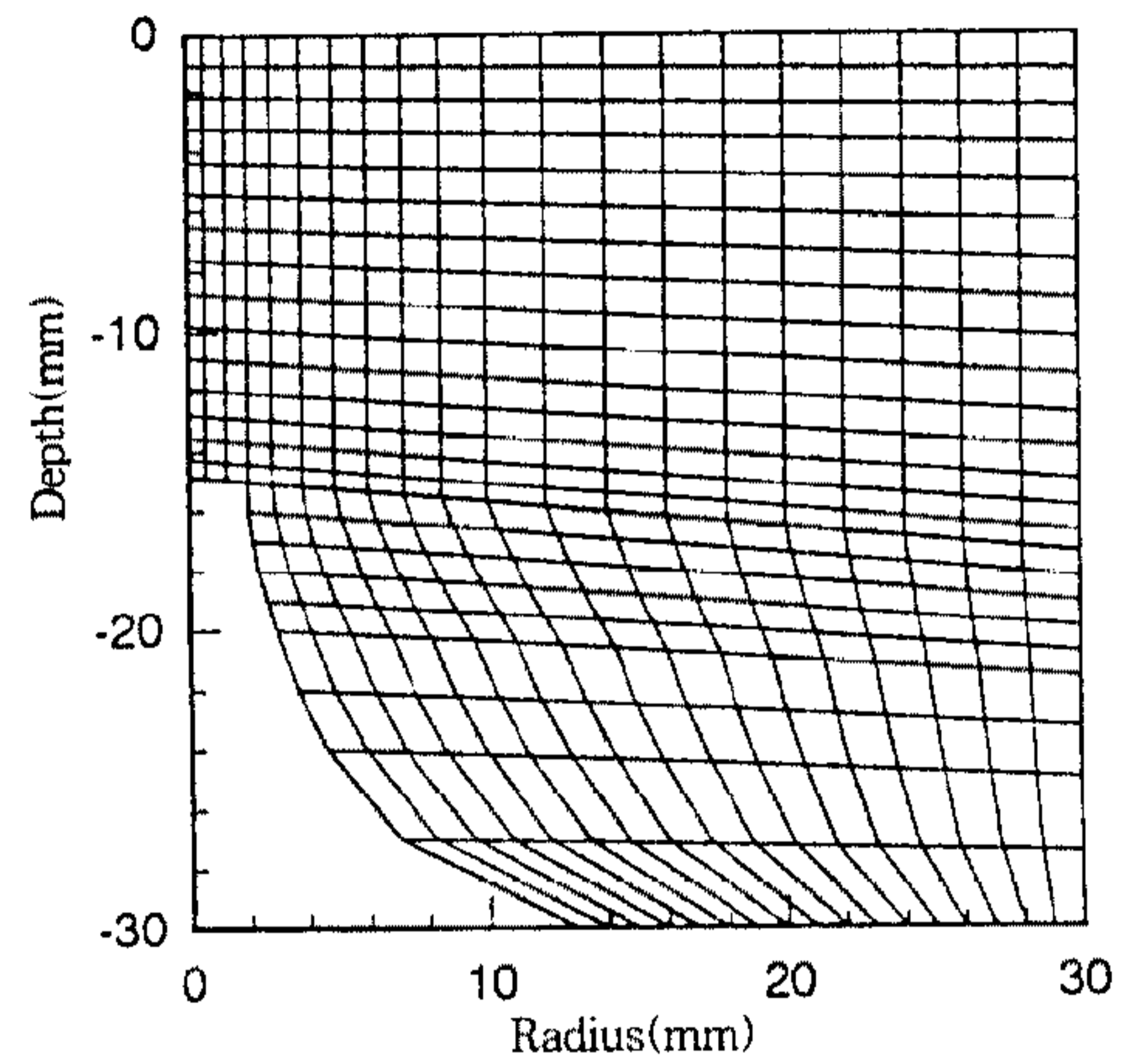
$$D_{da} = C_w D_{db} \quad (18)$$

$$(N_{da})^1 = (N_{da})^2 = \frac{N_{db}}{2C_w^3} \quad (19)$$

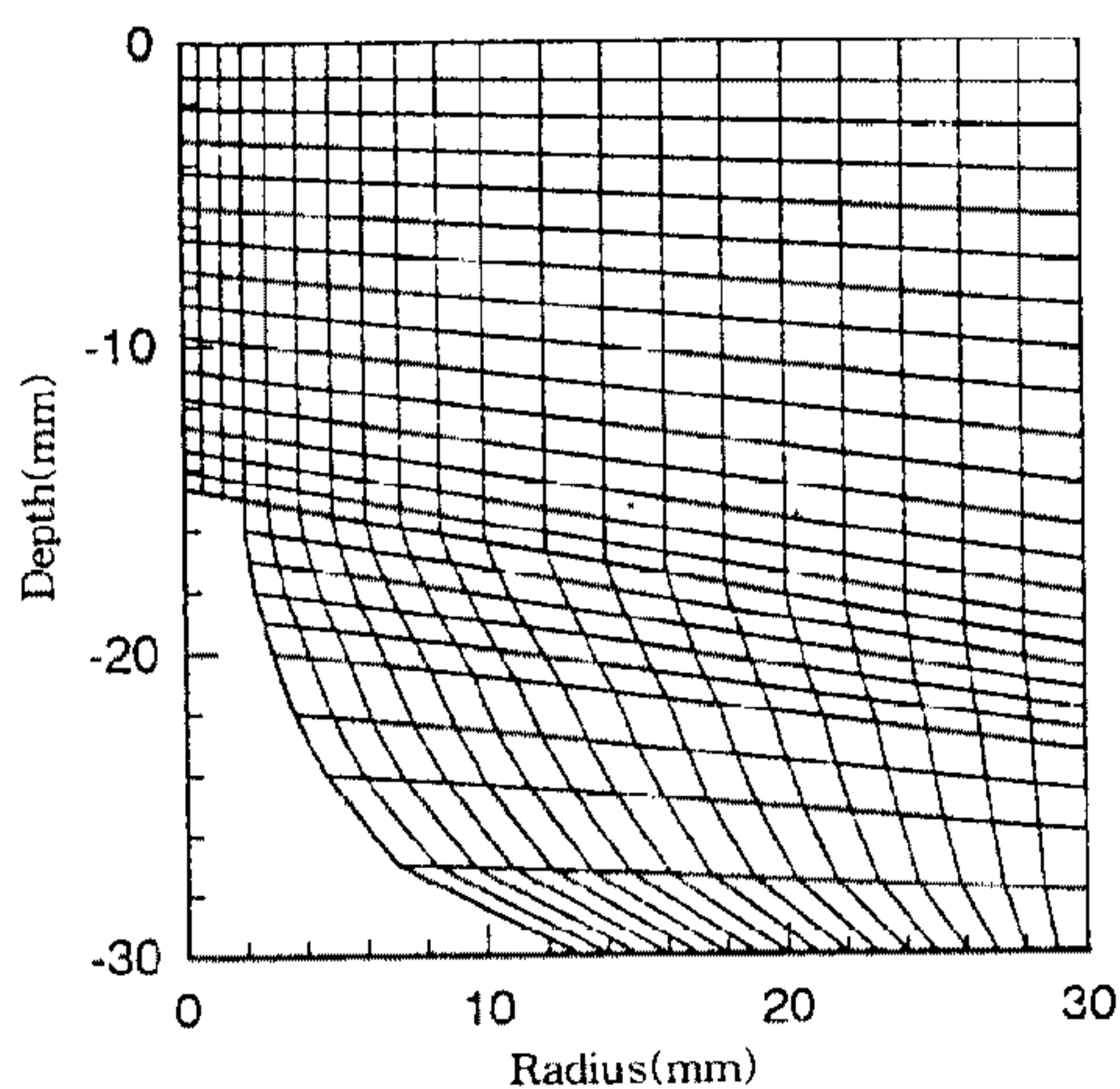
이 모델은 Park 등^{10,11)}에 의하여 여러 가지 조건에서 실험치와 비교검증되었다.



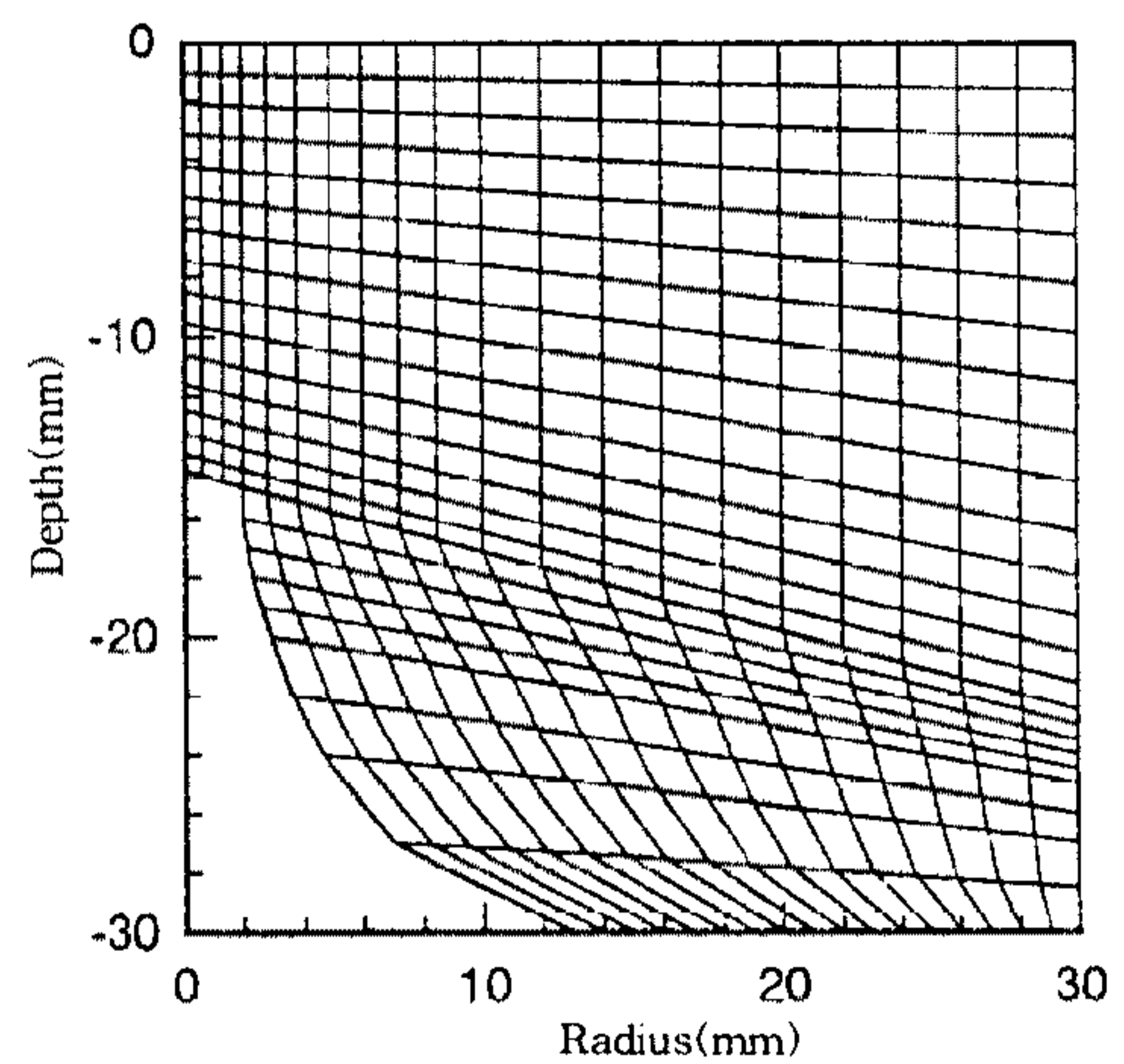
(a) angle=0°



(b) angle=5°



(c) angle=10°



(d) angle=15°

Fig.1 Calculation grid & simulated combustion chamber

3. 수치해석

연소실내 충돌면의 경사각도가 분무의 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Fig.1(a)는 수치해석에 사용된 그리드, 그리고 연소실 상부에 설치된 단공노즐로부터 15mm 떨어진 곳에 노즐의 분공 중심선과 자신의 중심선이 일직선을 이루도록 설치된 직경 4mm인 수평(0°) 충돌면을 함께 나타내고 있다. 중심선에 대해 대칭이므로 절반의 단면도만을 도시하였다. Fig.1(b)~(d)는 충돌면의 경사각도 5°, 10°, 15°일 경우와 각각의 수치격자를 나타내고 있다. 수치격자는 24×20으로서, 분무의 주 유동영역을 조밀하게 구성하여 정밀도를 높게 하였다. 그리고 모사 제원은 Table 1에 요약하였다.

Table 1 Simulated specifications

Simulated variables	Values
Injection hole diameter[mm]	0.24
Mean injection velocity[m/s]	122
Max. injection pressure[MPa]	16
Ambient pressure[MPa]	4.5
Ambient temperature[K]	773
Impaction distance[mm]	15
Bowl radius[mm]	30
Diameter of 0° impaction land[mm]	4
Impaction land surface angle[°]	0, 5, 10, 15
Grids	24×20

4. 결과 및 고찰

4.1 충돌면 경사각도 15°에서의 특성

Fig.2(a)는 분무의 시간특성이다. 분사된 연료는 모두 충돌면에 충돌한 다음, 충돌면 경사각도보다는 약간 작은 각을 이루면서 반경방향으로 빠른 속도로 퍼져 나간다. 시간이 경과함에 따라 분무는 아래쪽에서 위쪽으로 작용하는 유동의 영향에 의해 선단부가 위로 밀리면서 넓게 분산됨을 보여주고 있다. 분무의 반경방향 도달거리는 분사후 0.25ms에 7.5mm, 0.5ms에 15mm, 0.75ms에 18mm,

1.0ms에 21mm를 나타내고 있다. 이는 분사초기에는 액적들의 운동에너지가 크기 때문에 분무는 빠른 속도로 반경방향으로 운동하지만, 시간이 경과함에 따라 분무 선단부가 정지된 주위 공기의 저항을 더 많이 받게 되므로 운동에너지는 감소하고, 분무의 선단형태는 전형적인 버섯 모양을 형성하게 된다. 즉, 시간이 지남에 따라 분무 선단의 선속도는 감소하는 반면에 와류의 강도가 증가하기 때문에, 그 결과 분무의 반경방향 운동속도는 감소하고 상하로의 분산도는 크게 증가함을 잘 나타내고 있다.

Fig.2(b)는 가스유동의 시간특성으로서, 충돌면 경사각 연장선을 경계로 상하에서 발생된 유동은 반경방향으로 힘차게 뻗어 나가다가, 시간이 경과함에 따라 넓은 영역에 걸친 스월(swirl)을 발생시키고 있다. 그러나 충돌 경사면 연장선 상부에서는 분무연료에 의해 발생된 강력한 제트유동(jet flow)의 영향을 받기 때문에, 상부유동에 의해 발생된 하부유동보다는 더 강력하고 큰 스월(swirl)을 형성하게 된다.

Fig.2(c)는 증발연료분포의 시간특성이다. 분사후 0.25ms에는 충돌면 부근에 밀집된 상태이지만 분사후 0.5ms에는 반경방향으로 크게 발달함을 보이고 있다. 그러나 분사후 0.75ms와 1.0ms에는 반경방향으로의 분포는 둔화되고, 반면에 상하방향으로의 분포가 크게 발달하는 것으로 나타나고 있다. 즉, 증발연료의 분포특성은 분무의 시간특성과 같은 경향성을 나타내는 것으로 평가된다.

4.2 충돌면 경사각과 유동특성

Fig.3은 경사각도가 각기 다른 충돌면에 대한 분사후 1.0ms의 유동특성이다. 경사각 0°의 경우, 충돌면을 경계로 상하방향의 넓은 영역에 걸친 스월*(swirl)이 대칭을 이루면서 퍼져 나감을 보여주지만, 상하방향으로의 스월 발생이 작음을 알 수 있다. 충돌면 상부에서는 분무연료에 의해 발생된 제트유동(Jet flow)이 반경방향으로 진행된다. 그리고 연소실 하부에서 충돌면 측면을 따라 올라오는 유동에 의하여 아래로 향하던 유동이 곧바로 윗방향으로 전환되고 있다. 충돌면 경사각 5°인 경우, 경사각 0°에서와 유사한 유동이 발생하

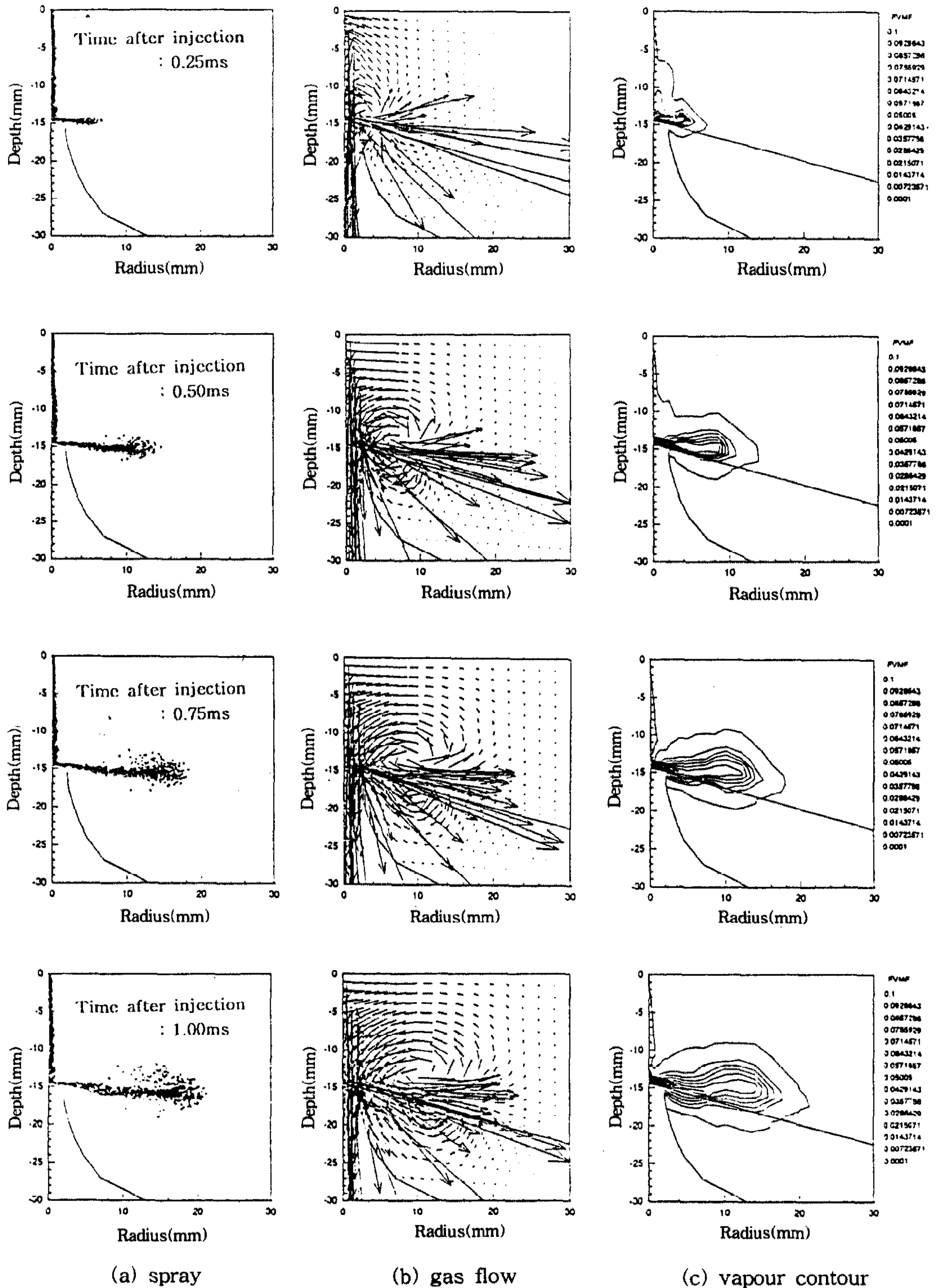


Fig.2 Spray, gas flow, and vapor contour at land angle 15°

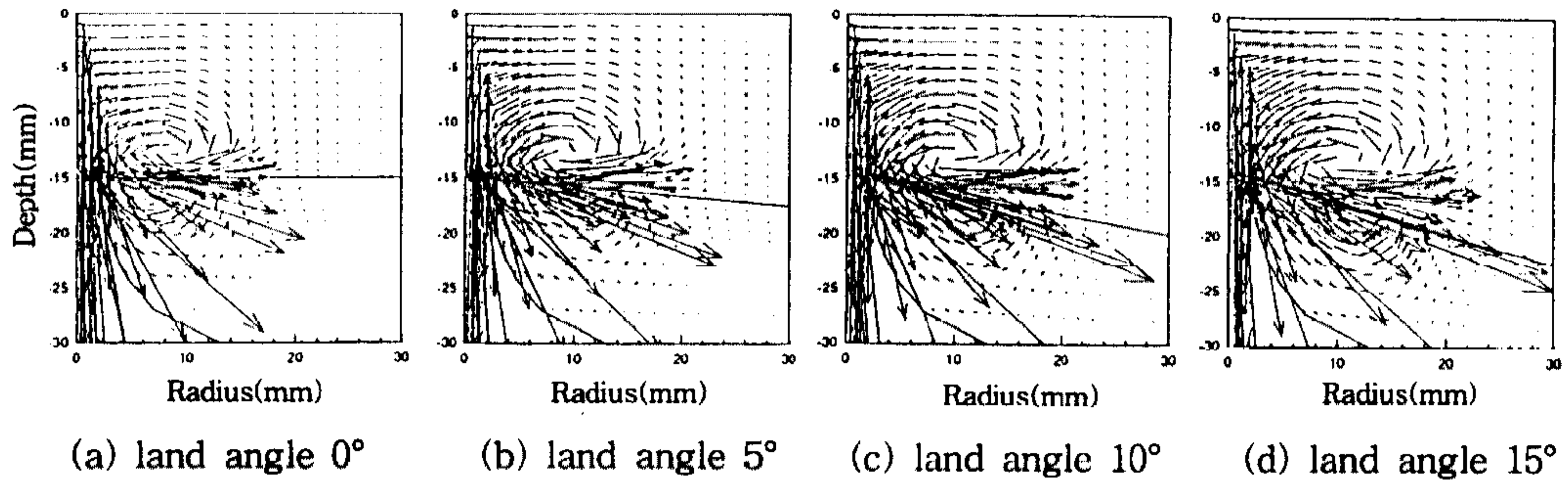


Fig.3 Flow characteristics at 1.0ms after impaction

고 있지만 주유동의 방향은 경사각 연장선을 따라 밀집되고 있으며, 스월의 직경은 약간 커지고 있다. 경사각 10°와 15°의 경우 경사각이 커짐에 따라 유동은 힘차게 뺏어 나가며, 유동에 의한 스월의 강도도 더욱 커지고 있다. 충돌면 경사각이 커짐에 따라 분무에 의한 제트기류 중 충돌면을 스쳐 지나가는 양이 증가하게 되므로 주유동은 거의 경사각 연장선 방향으로 진행된다. 즉, 경사각이 커짐에 따라 유동은 반경방향으로 강력하게 뺏어 나가며, 동시에 유동에 의한 상하방향의 스월 강도도 증가한다.

4.3 충돌면 경사각과 분무특성

Fig.4는 경사각도가 각기 다른 충돌면에 대한 분사후 1.0ms의 분무액적 상태를 나타내고 있다. 충돌면 경사각 0°인 경우, 충돌면에 충돌된 액적들이 충돌면 반경방향으로 진행되는 동시에 아래로 휘어지면서 퍼져 나간다. 이렇게 휘어져 내려가던 분무는 아래쪽에서 위쪽으로 작용하는 유동의

영향에 의해 끝부분에서 위쪽으로 밀려 올라감을 보이고 있다. 충돌면 경사각 5°인 경우, 경사각 0°인 경우와 비교하면, 분무의 반경방향 도달거리는 거의 같으나 상하방향의 폭은 크게 넓어져 분무 선단이 잘 발달되어 있음을 알 수 있다. 충돌면 경사각 10°, 15°에서 분무액적은 충돌면 경사각 연장선을 기준으로 할 때, 대부분 상부에 분포되어 있으나, 앞서 0°나 5°일 때와 비교하면 현저하게 아래 영역에 분포됨을 나타내고 있다. 그리고 충돌면 경사각도가 커짐에 따라 분무액적은 반경방향으로는 더욱 멀리, 상하방향으로는 더욱 넓게 분포되고 있다.

4.4 충돌면 경사각과 증발연료의 분포

Fig.5는 분사후 1.0ms후의 증발연료의 분포로서, 유동특성 및 분무특성과 유사한 경향성을 나타내고 있다. 충돌면 경사각이 증가함에 따라 증발연료의 분포는 반경방향과 상하방향으로 동시에 점차 발달함을 나타내고 있다. Fig.6은 반경방향의

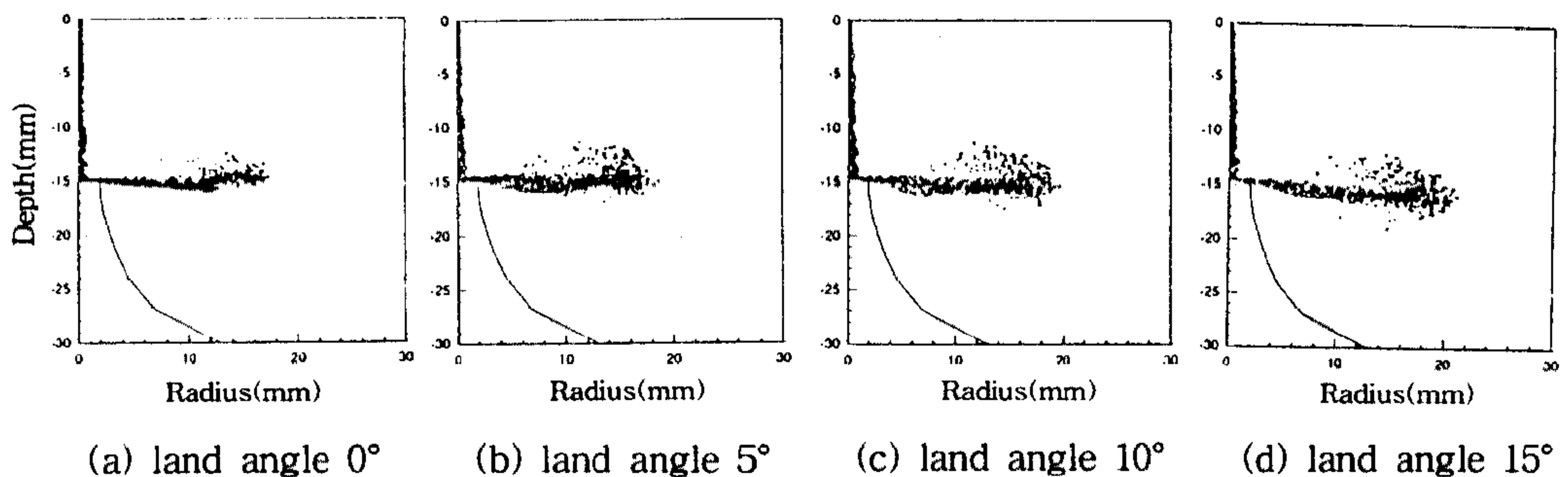


Fig.4 Spray characteristics at 1.0ms after impaction

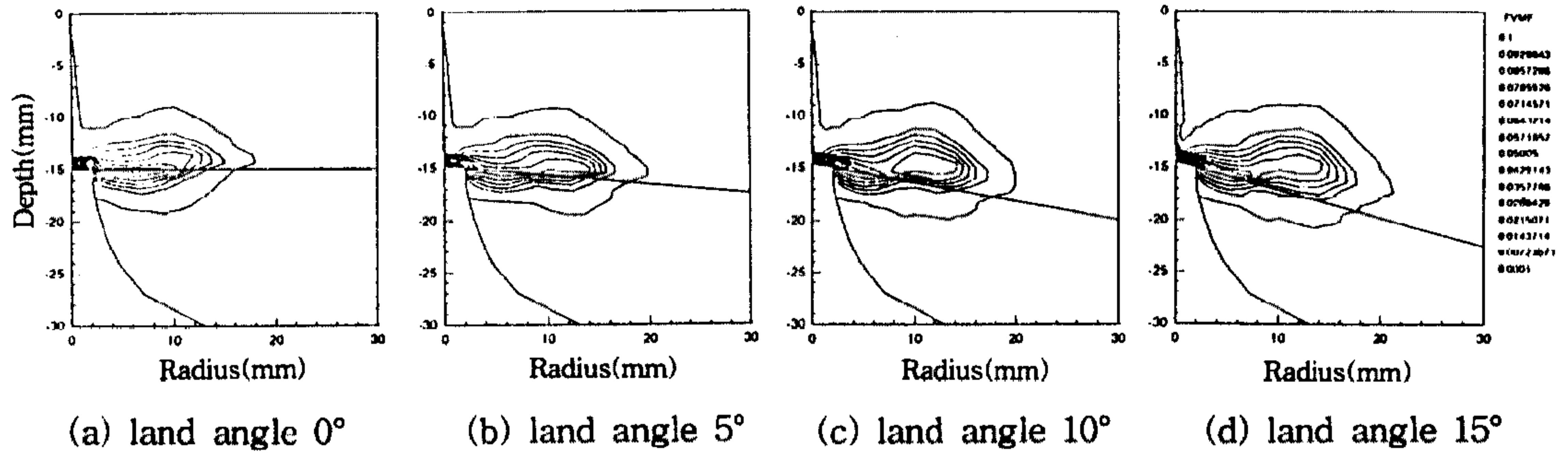


Fig.5 Fuel vapor contour at 1.0ms after injection

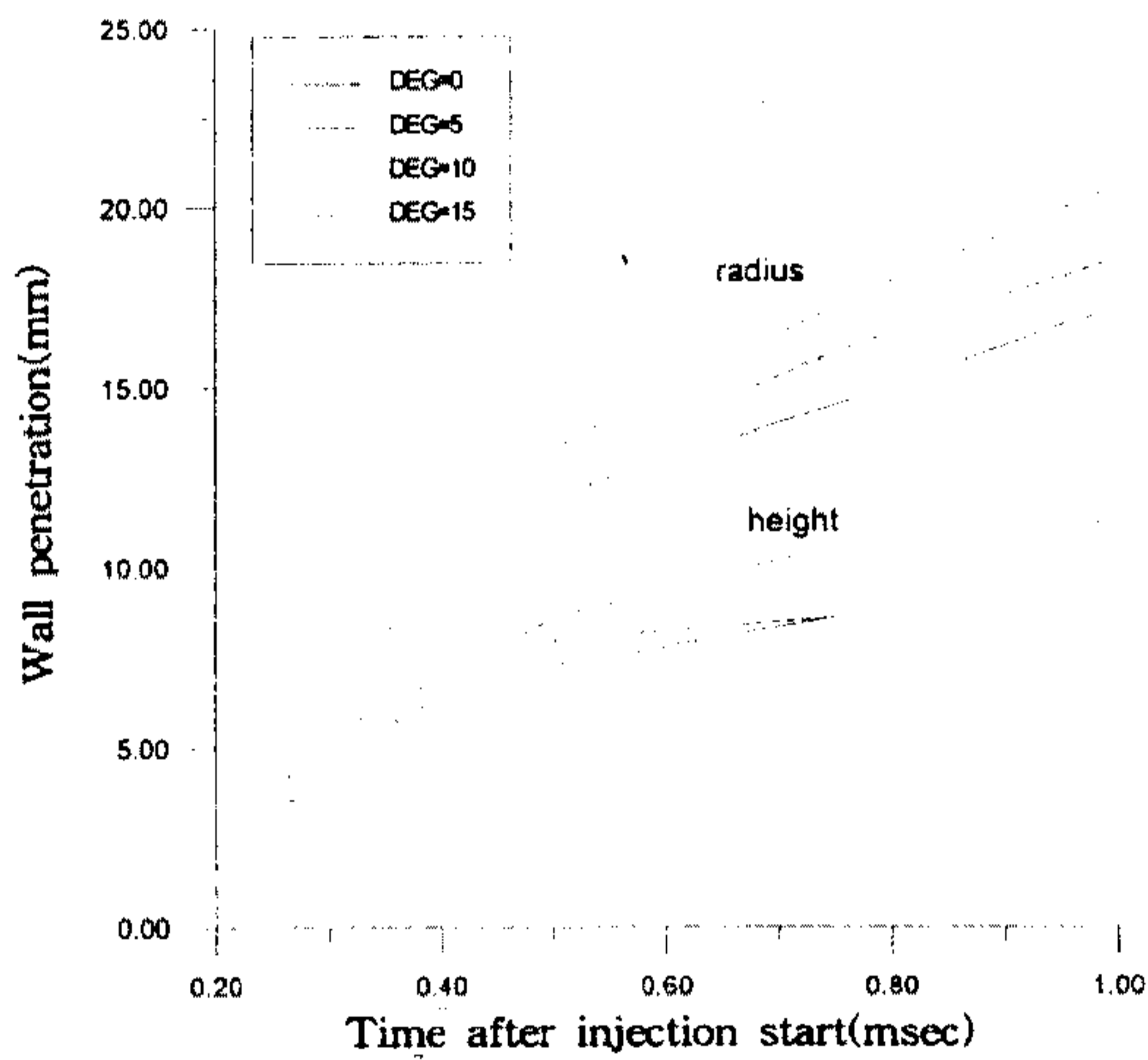


Fig.6 Comparison of R & H

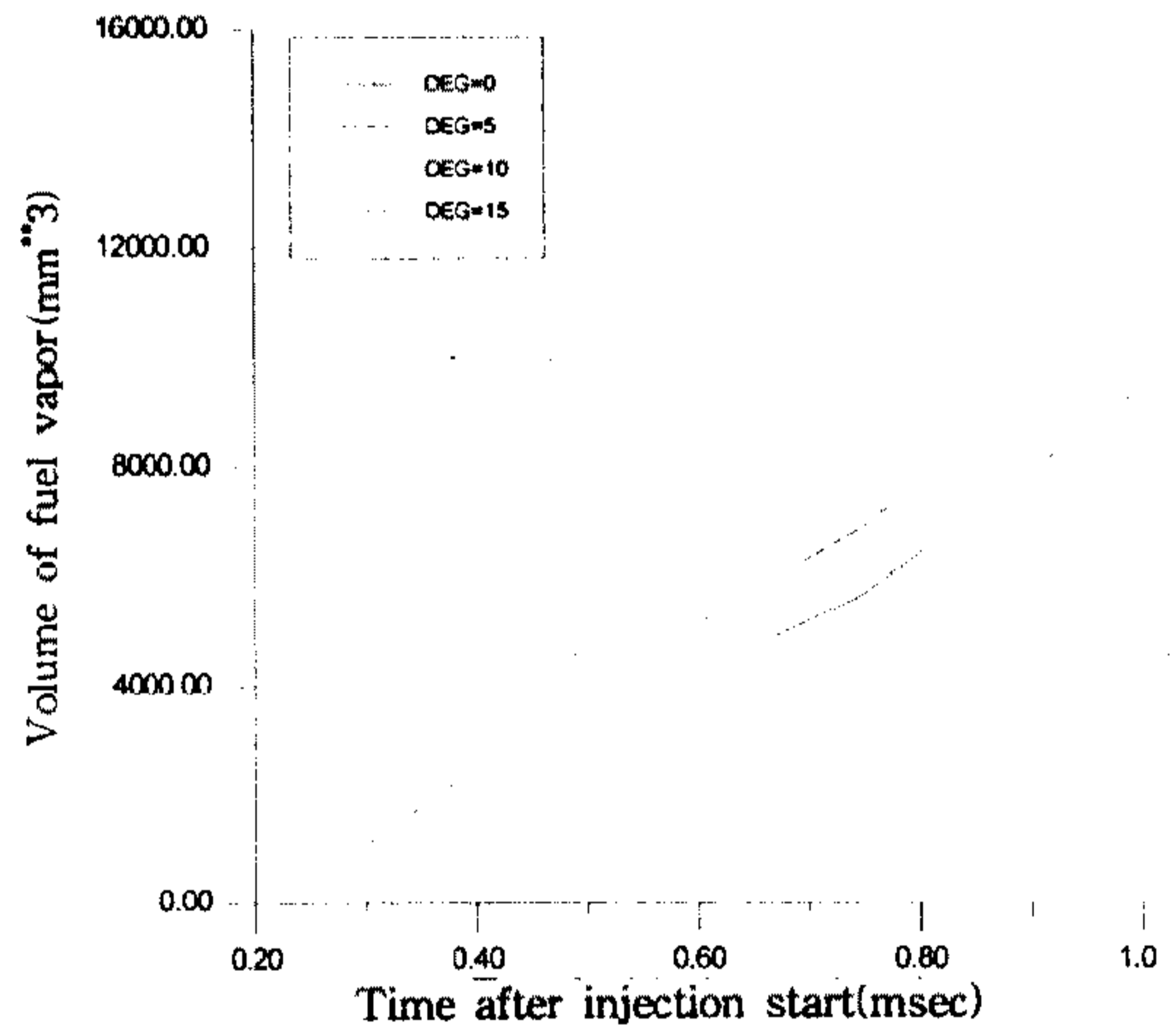


Fig.7 Comparison of Vol. of fuel vapor

퍼짐(γ)과 상하방향의 퍼짐(H)을, 그리고 Fig.7은 증발연료의 체적($\pi r^2 H$)을 각각 시간변화에 대응시켜 나타낸 그림이다. Fig.6에서 반경방향의 퍼짐은 1.0ms까지 시간경과에 직선적으로 비례하여 증가한다. 그러나 상하방향의 퍼짐은 0.5ms까지는 반경방향의 퍼짐과 마찬가지로 급격히 증가하나 그 이후에는 완만하게 증가하고 있다. Fig.7에서 보면 증발연료의 체적은 총돌면 경사각에 비례하여 증가하고 있다. 즉, 경사각 15°에서 가장 좋은 분포상태를 나타내고 있다.

4.5 총돌면 경사각과 SMD

Fig.8는 시간경과에 따른 SMD의 변화를 나타내고 있다. 시간이 경과함에 따라 총돌면 경사각과 상관없이 SMD가 점차 작아지고 있다. 그리고

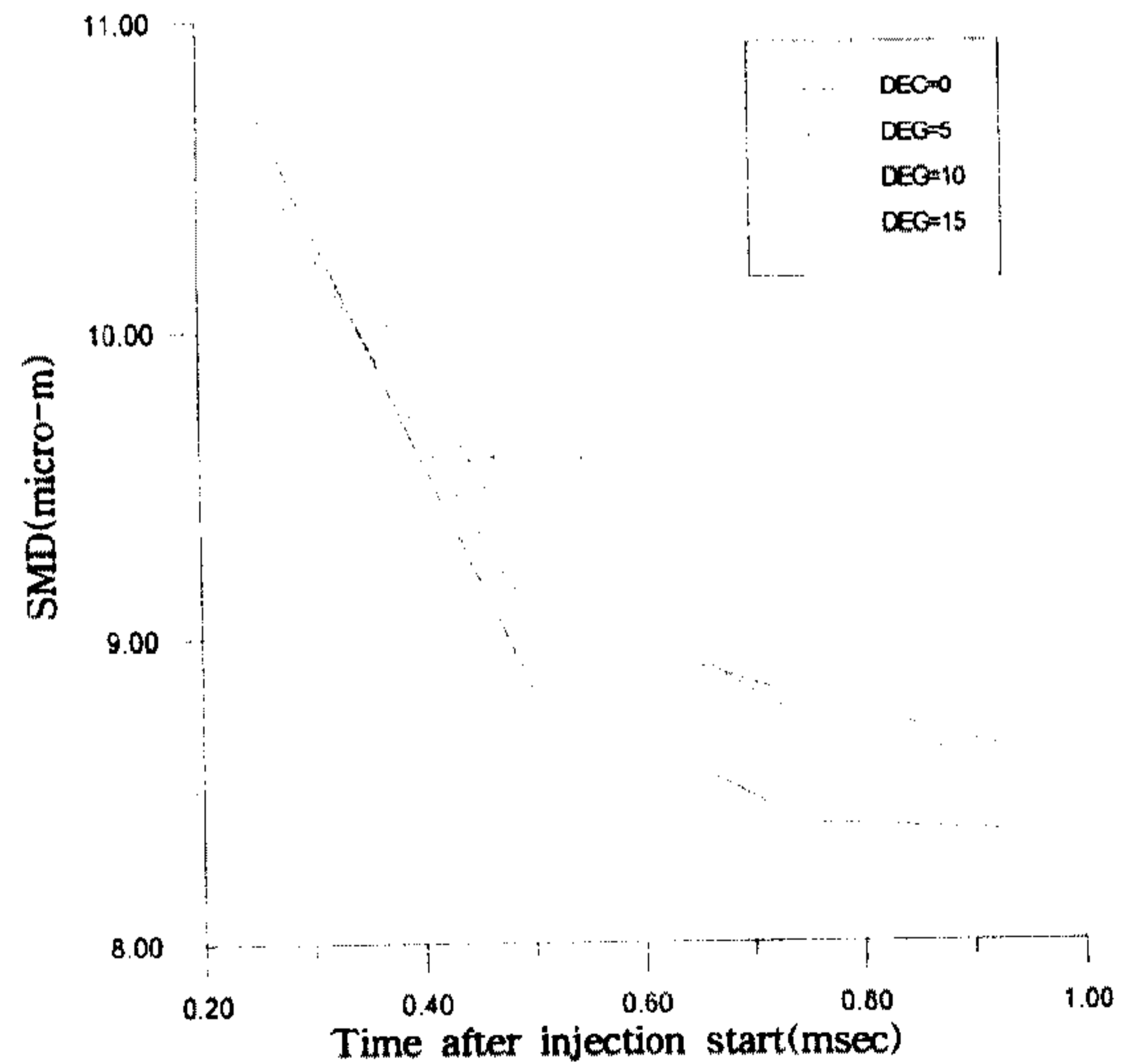


Fig.8 Comparison of SMD

충돌면 경사각의 영향은 그리 크지 않은 것으로 분석된다.

SMD는 벽면충돌에 의한 분쇄현상(break-up), 벽면부위에 퇴적된 액적들간의 응집현상, 주위공기와의 상대속도/온도 등에 의한 증발현상 등의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 충돌면 경사각 0°인 경우에는 액적들의 수직충돌속도가 가장 크기 때문에 충돌에 의한 분쇄효과의 영향을 가장 크게 받을 것이다. 그러나 충돌면 경사각이 증가함에 따라 액적들의 수직충돌속도는 감소하므로 충돌에 의한 액적분쇄효과도 비례하여 감소하게 될 것이다. 한편으로는 경사각이 증가함에 따라 분무특성과 증발연료의 분포특성 등이 개선됨으로서 액적들의 응집현상은 감소하고, 주위공기와의 상대속도/온도 등의 영향이 커지게 되어 SMD는 역시 작아지게 되는 것으로 판단된다. 결과적으로 충돌분무의 SMD는 충돌면 경사각에 관계없이 자유분무의 SMD보다 작으며, 각도의 증가에 따라 SMD가 증감을 반복하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

이상의 분석으로부터 충돌면 경사각의 변화가 분무특성에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 1) 유동특성은 충돌면 경사각 15°인 경우가 상하방향의 넓은 영역에 걸친 스월을 동반한다.
- 2) 분무의 선단은 충돌면 경사각에 관계없이 버섯모양을 형성한다.
- 3) 증발연료의 분포상태는 보울 직경 30mm인 경우엔 충돌면 경사각 0°가, 보울직경 40mm가 되면 충돌면 경사각 15°가 가장 양호한 것으로 나타났다.
- 4) SMD는 충돌면 경사각과는 거의 무관하게 충돌후 시간경과에 비례하여 작아진다. 그리고 충돌분무의 SMD는 자유분무의 SMD보다 작다.
- 5) 연소실의 형상과 제원에 따라 상기 분석의 결과를 적절히 활용함이 요구된다.

참 고 문 헌

1. C. A. Kroeger, "A neat methanol direct

injection combustion system for heavy duty applications", SAE 861169, 1986.

2. J. D. Naber, B. Enright and D. Farrel, "Fuel impingement in a direct injection diesel engine", SAE 881316, 1988.
3. Kato, S. and Onishi, S., "New type of Diesel Engine by Impingement of Fuel Jet(OSKA-D)", SAE 901618, 1990.
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., 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, pp. 114~124, 1993.
6. Park, K. and Watkins, A. P., "Optimizing D.I. diesel engine combustion chamber system using new wall impactation model", 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp. 99~104, 1995.
7. K. Park, T. F. Yeung, "새로운 형상의 디젤엔진 연소실 설계를 위한 주위조건의 분석", 한국자동차공학회 논문집 제4권 제2호, pp. 60~68, 1996.
8. A. P. Watkins, "Three-dimensional modelling of gas flow and sprays in diesel engine", In Makatos, N. C., editor, Computer Simulation of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer and Combustion in Reciprocating Engines, pp. 193~237, Hemisphere, 1989.
9. H. Khaleghi, "Three-dimensional modeling and comparison with experiment of spray and gas flow in test rigs and diesel engines", PhD Thesis, University of Manchester, Faculty of Technology, 1990.
10. K. Park, "Development of a non-orthogonal grid computer code for the optimization of direct injection diesel engine combustion chamber shapes", PhD The-

- sis, University of Manchester, Institute of Science and technology, 1994.
11. Watkins, A. P. and Park, K., "Assessment and Application of a New Spray Wall Impaction Model", Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines, I. Mech. E, pp. 1~10, 1996.
 12. 김재휘, 홍영표, 박권하, "OSKA형 디젤기관 연소실의 충돌면 크기분석", 한국박용기관학회지, 제20권 제3호, 1996.
 13. Jayaratne, O.W. and Mason, B.T., "The coalescence and bouncing of water drop at air/water interface", Proc. R. Soc. Lond-A, 280, pp. 545~656, 1964.
 14. 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, Vol. 21, pp. 1047~1056, 1966.
 15. Yun-yi Gong, Lin-hua You and Xuan-ming Liang, "An Investigation on Droplet Size Distribution and Evaporation of Diesel Fuel Sprays at High Injection Pressure by Using Laser Diagnostic Technique", SAE 920090, 1992.