

분사각 및 스윙 변화에 따른 디젤분무의 특성에 관한 수치 해석

정훈^{*1}, 차경세(전남대학교 대학원)^{*2}, 박찬국(전남대학교)^{*3}

Numerical analysis on the characteristics of diesel spray for variation of injection spray angle and swirl ratio.

H. Jung, K. S. Cha, C. G. Park

ABSTRACT

In high-pressure diesel engine, the injected fuel spray impinges on the piston cavity surface due to the short distance between the injection nozzle and the cavity wall. The behavior of the impinging spray has the great influence on the dispersion of fuel, the evaporation, and the mixture formation process. In this study, the numerical simulation using the GTT code was performed to study the gas flows, the spray behaviors, and the fuel vapor distributions in the combustion of a D.I engine for variation of spray angle and swirl ratio.

주요 기술 용어 : 충돌 분무(Impinging Spray), 분무 특성(Spray Characteristics), 연료 증기분포(Fuel Vapor distribution), 선회류(Swirl Flows), 공연비(A/F ratio)

1. 서 론

자동차엔진은 화학적인 에너지로부터 기계적인 동력으로의 효율적인 전환 뿐만 아니라, 점차적으로 환경에 기인한 엄격한 배기가스 규제를 받고 있다. 자동차 엔진중 디젤 엔진은 과거에 주로 높은 동력을 필요로하는 대형 자동차의 동력원으로 사용되었지만, 점차 높은 동력에 대한 요구 뿐만 아니라 배기 가스 저감이 매우 중요한 문제로서 요구되어지고 있다. 디젤 엔진에서 연소과정을 잘 이해하는 것은 배기 가스의 제어 및 엔진성능을 향상시키는데 있어 매우 중

요하다. 엔진의 성능향상을 실현하기 위해서는 실린더 내의 연료 액적의 미립화 과정이나 증발 과정, 공기와의 혼합 상태에 대한 자세한 이해와 제어가 필요하고, 그에 따른 연소의 최적화가 필요하다.

최근들어 디젤 엔진의 고압 분사에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 고압에 의한 연료 분사는 연료를 실린더내에 보다 깊이 침투하여 벽면과 충돌을 수반하게 되는 경우가 많다. 또, 어떤 엔진의 경우에는 의도적으로 벽면에 연료를 충돌분사시킴으로써 성능향상과 배기가스 저감에 있어 좋은 효과를 얻게 되는 경우도 있다.⁽¹⁾

본 연구에서는 정적 용기내의 충돌 분무에 대해 수치해석을 행하였으며, 여기에서 얻어진 결과를 토대로 디젤 연소실내 스윙 변화와 고압 연료 분사각 변화에 따른 분무 평균 반경(SMR),

*1 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*2 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*3 정회원, 전남대학교 기계공학과

공연비(A/F), 분무 시작후 시간 경과에 따른 분무 거동, 분무실 벽면 충돌시의 분산 특성을 파악하여 비교, 분석하였다.

2. 분무유동장 해석모델

본 연구에서는 유동계산 수법으로 Gosman⁽²⁾, Spalding⁽³⁾이 개발했던 Tank and Tube법을 일반 곡선 좌표변환의 수법을 도입해 일반화했던 GTT(Generalized Tank and Tube method)법을 이용하였다. GTT 법에 있어서 우선 전 계산 영역을 임의 형상의 6면체 미소 체적요소로 분할하고, 이것을 일반 곡선 좌표 변환을 이용해, 입방체 체적 요소로 변환한다. 압력 P, 밀도 ρ , 비엔탈피 h, 확산 에너지 k, 확산 에너지 산일을 ϵ 는 체적 요소의 중앙에 배치하고, 그것들을 체적 요소에 똑같이 분포하는 것으로 한다. 또, 속도의 3 성분 U, V, W는 체적요소의 각 정점에 배치하고, 체적요소의 각 표면에 있어서 선형에 분포하는 것으로 한다. 분무의 계산 수법은 기본적으로 KIVA code⁽⁴⁾의 분무 모델을 응용하여 이것에 액막 분열 모델, 벽면 충돌 모델의 추가와 확산이 액막에 미치는 영향에 대해 k- ϵ 모델용으로 변경하는 등의 개량이 첨가되었다.

2.1 연료분사 및 액적 분열모델

연료분사 및 액적의 분열에 대한 모델로는 Reitz가 제시한 Wave Breakup⁽⁵⁾ 모델을 기초로 하여 개량된 Wave 모델⁽⁶⁾을 사용하였다.

액적 분열 과정에서 액체 표면과의 성장에 따라 새로이 생성되는 미소 액적의 형성은 다음식을 만족한다.

$$r_c = B_0 \Lambda \quad (B_0 \Lambda \leq r_p)$$

$$r_c = \min \left[\begin{array}{l} (3\pi r_p^2 v_{rel}/2\Omega)^{0.33} \\ (3r_p^2 \Lambda/4)^{0.33} \end{array} \right] \quad (1)$$

$$(B_0 \Lambda \geq r_p)$$

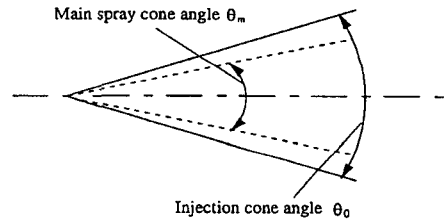
여기서, Λ 는 가장 빠른 성장을 한 액체 표면파의 파장, Ω 는 최대 성장률, v_{rel} 은 주위 기체에 대한 액적의 상대속도다.

또, 모체가 되는 액적의 특성크기는 액적의 분열에 의해 다음식을 만족하면서 변화한다.

$$\frac{dr_p}{dt} = -\frac{r_p - r_c}{t_b} \quad (r_c \leq r_p) \quad (2)$$

$$(t_b = \frac{3.726 B_1 r_p}{\Lambda \Omega}, B_0, B_1 : \text{model coefficient})$$

Reitz는 분사액적 parcel 전체에 대해서 상기의 모델을 적용하고 있지만, 그 경우 평균입경이 지나치게 작게 되는 것을 알수 있다. 그래서 분사 외주부에서 미립화가 촉진되는 것이라 판단돼 Fig. 1에 표시되는 모양과 같이 분사 원추각 θ_0 일때 θ_m 범위의 외측 parcel만 자액적을 만들 수 있는 것으로 하였다. 분사 원추각 θ_m 이 감소할 때 더욱 많은 자액적이 형성되며, 결과적으로 액적 크기가 더 작아지는 것을 볼수 있다. θ_m 가 증가할 때 자액적의 크기가 더욱 커지



며, 자액적의 수가 감소함을 볼 수 있다. 개량된 Wave Breakup 모델에서는 분사 원추각 θ_0 의 95%에서의 외측 parcel만 자액적을 만들 수 있다고 가정하였을 때 액적 크기 분포나 계산 시간에 있어서 가장 좋은 결과를 얻었다.⁽⁶⁾

Fig. 1 Illustration of injection cone angle and main spray cone angle θ_0

2.2 벽면 충돌 모델

벽면에 충돌하기 직전의 액적 입사 웨버수는 We_{in} 으로 액적의 임계 웨버수 We_{c1}, We_{c2} (단, $We_{c1} < We_{c2}$)에 의해 3개의 영역으로 분류하고 각각에 대해 다음과 같은 모델을 적용하였다. 입사 웨버수는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$We_{in} = \frac{\rho_p (v_d)_n^2 r_d}{\sigma_d} \quad (3)$$

$(v_d)_n$: 벽면에 대한 액적의 상대 속도의 벽면 법선방향 성분, σ_d 은 표면 장력, ρ_d 은 particle density, r_d : particle의 반경

(1) We_{in} 가 $We_{cl}(=40)$ 보다 큰 경우에 액적은 벽면에 충돌한 후 튕겨나간다. 이때, 벽면 접선 방향의 속도 성분은 변화하지 않지만, 법선 방향의 속도 성분은 Jayaratne⁽⁷⁾의 실험 결과에 따라 다음 식을 만족하면서 줄어든다.

$$\frac{(v_d)_{in}^2 - (v_d)_{out}^2}{(v_d)_{in}^2} = 0.95 \sin^2 \theta_{in} \quad (4)$$

($(v_d)_{in}$: 액적의 입사속도, $(v_d)_{out}$: 액적의 반사속도)

(2) We_{in} 가 임계 웨버수 We_{cl} 보다는 크고 $We_{cl}(=300)$ 보다 작을 때 액적은 벽면에 충돌 후 부착한다.

(3) 입사 웨버수 We_{in} 가 We_{cl} 보다 작을 때 액적은 부착확률 f 에 의해 벽면에 부착하는 것과 분열해서 흩어지는 것으로 나뉜다.

$$f = \exp\{(300 - We_{in})/6000\} \quad (5)$$

2.3 분무 증발 모델

본 연구에서의 분무 모델은 기본적으로 KIVA code⁽⁴⁾의 이산 액적 모델을 이용하고 있다. 이산 액적 모델은 실제 분무 전체가 수천 개의 parcel이라 불리는 액적 대표입자로 이루어졌다고 간주하며, parcel은 위치, 속도, 반경, 온도등의 값을 갖는 것으로 간주하였다. 분무 방정식은 이 parcel에 따라 계산된다. 액적의 경우 항력에 의해 그 형상이 변화하며 이에 따라서 어느 이상의 Re_d 에서는 종속도는 액적 크기에 관계없이 일정해진다.(이때 Re_d 수에서 사용되는 특성길이는 변형된 액적과 동일한 체적을 가지는 구형 액적의 등가 직경이다.항력계수 C_D 는 점도와 무관하게 되고 액적의 크기에만 비례하게 된다.

여기서 입자의 가속도 \vec{a}_d 는 입자의 항력계수 C_D 를 써서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{a}_d = \frac{3}{8} \frac{\rho_g}{\rho_d} \frac{|\vec{v} + \vec{v}' - \vec{v}_d|}{r_d} C_D + g \quad (6)$$

또한, 항력계수는 Re_d 에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D = \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{1}{6} Re_d^{\frac{2}{3}} \right) \quad Re_d < 1000$$

$$C_D = 0.424 \quad Re_d \geq 1000 \quad (7)$$

입자의 Re_d 는 속도의 변화를 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Re_d = \frac{2\rho_g |\vec{v} + \vec{v}' - \vec{v}_d| r_d}{\mu_g(\hat{T})} \quad (8)$$

($|\vec{u} + \vec{u}' - \vec{v}_p|$: 가스 및 액적의 상대속도, g : 중력 가속도, ρ_d : 액적 밀도, ρ_g : 가스 밀도)

$$\mu_g = A_1 \hat{T}^{3/2} (\hat{T} + A_2) \quad (A_1, A_2 : \text{constants})$$

$$\hat{T} = (T + 2T_d)/3$$

증발에 의한 액적 반경 r_d 는 다음 식으로부터 계산하였다.

$$dr_d/dt = -[(\rho D)_g / (2\rho_l r_d)] [(C^* - C)/(1 - C^*)] Sh_d$$

여기에서

$$Sh_d = (2.0 + 0.6 Re_d^{\frac{1}{2}} Sc_d^{\frac{1}{3}} [\ln(1 + B_d)] / B_d$$

$$Sc_d = \mu_g / (\rho D)_g, \quad B_d = (C^* - C)/(1 - C^*)$$

$$(\rho D)_g = D_1 \hat{T}^{D_2} \quad (D_1 \text{ and } D_2 : \text{constants})$$

액적 표면에서의 연료 증발농도 C^* 는 다음 식에 의해 결정된다.

$$C^* = M_1 / [M_1 + M_0(p/p_v - 1)]$$

(M_1 : 증발 연료의 분자 무게, M_2 : 가스 분자 무게, P_v : T_d 에서의 증발연료 압력)

액적 온도 T_d 는 다음식에 의해 결정된다.

$$(4/3)\pi r_d^3 \rho_l c_p dT_d/dt = 4\pi r_d^2 \rho_l q_L dr_d/dt$$

$$+ 4\pi r_d^2 [\lambda_g (T - T_d)/(2r_d)] N_d$$

(q_L : 증발 잠열)

$$N_d = (2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr_d^{1/2}) [\ln(1 + B_d)] / B_d$$

$$Pr_d = \mu_g(c_p)_g / \lambda_g, \quad \lambda_g = K_1 \hat{T}^{3/2} / (\hat{T} + K_2)$$

(K_1, K_2 : constants)

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 충돌을 고려한 분무 유동

벽면 충돌 분무모델의 타당성을 검증하기 위해 Table 1에 나타낸바와 같이 Fujimoto⁽⁸⁾등의 실험조건과 동일한 조건하에서 수치해석을 행하여 비교하였다. 수치 해석에 사용된 계산 격자

는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3은 충돌 분무의 구조를 형상화한 것이다. 경사 충돌인 경우의 B_{x1} 은 충돌 후 액적의 포물선형 분포에서 장축 선상의 하류쪽 도달거리, B_{x2} 는 장축선상의 분포에서 단축선상의 도달거리, H_z 은 충돌 후 하류쪽의 벽면에 수직인 방향으로 가장 높은 곳에 도달한 액적의 높이를 나타낸다. β 는 액적들이 벽면에 수직인 방향과 이루는 각도, θ 는 분무 각을 나타낸 것이다. Fig.4~5는 분무 시작 후 1.0,1.2,1.6ms 경과 후, 수직 충돌인 경우와 충돌각도가 30deg인 경우에 대하여 x-z 평면과 x-y 평면에서의 액적 분포를 나타낸다. Fig.6~7에서 분무 도달거리에 대한 실험결과와 계산 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Table. 1 Calculation parameters.

Nozzle number	1
Nozzle diameter [mm]	0.2
Injection pressure [Mpa]	13.8
Injection duration [ms]	1.3
Injection fuel temperature [K]	300
Ambient air pressure [MPa]	1.5
Ambient air temperature [K]	300
Ambient air density [kg/m ³]	18.5
Impingement distance [mm]	24
Inclination angle [deg.]	0, 15, 30

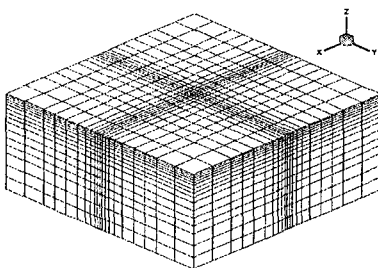


Fig. 2 Computational grid for impingement spray(grid number 24×24×18)

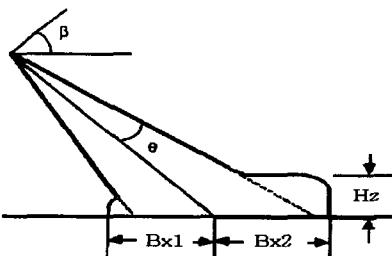
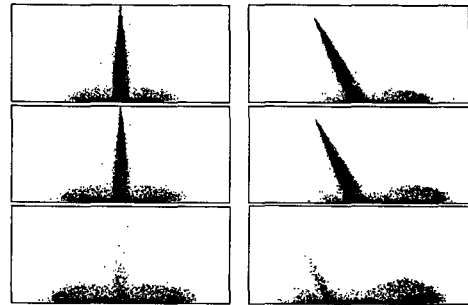
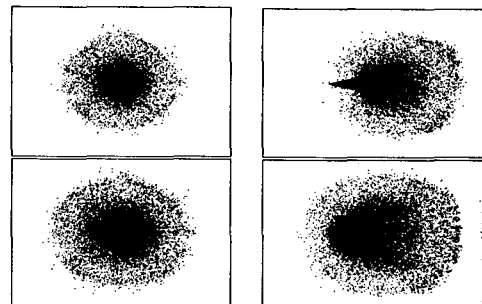


Fig. 3 Definition for structure of impinging spray



(a) Normal impingement($\beta = 0^\circ$)
(b) Oblique impingement($\beta = 30^\circ$)

Fig. 4 Distribution of droplets of impinging sprays at 1.0, 1.2 and 1.6ms after the start of injection in a x-z plane



(a) Normal impingement($\beta = 0^\circ$)
(b) Oblique impingement($\beta = 30^\circ$)

Fig. 5 Distribution of droplets of impinging sprays at 1.2 and 1.6ms after the start of injection in x-y plane

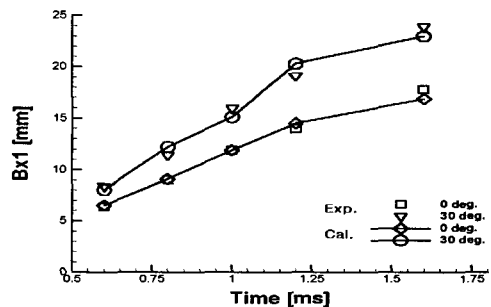


Fig. 6 Comparison for penetration radius in downstream of impinging spray versus time after the start of injection

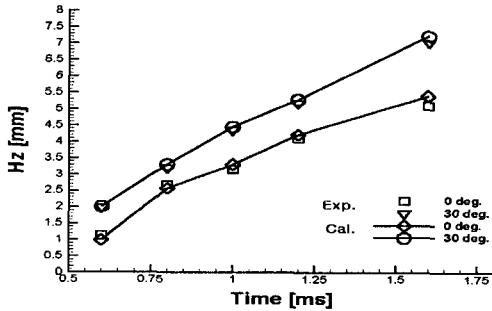


Fig. 7 Comparison for penetration height in downstream of impinging spray versus time after the start of injection

3.2 디젤 연소실내 분무

연료 분사시 연소분무의 연소실 벽면 충돌 및 선회 유동에 의한 분산특성은 연소과정 중의 연료와 공기의 혼합 및 연소에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

본 연구에서는 GTT(Generalized Tank and Tube method) code를 사용하여 분사 각도와 선회비를 바꾸어 봄으로써 연료 분사각도와 선회비에 변화에 따른 SMR, 공연비(A/F), 분무 시작 후 시간 경과에 따른 분무 거동, 분무실 벽면 충돌시의 분산 특성을 파악하여 비교, 분석해 보았다.

분사 압력은 32MPa으로 일정하게 주었으며, 초기 가스의 온도와 압력은 각각 293K, 101KPa로 주었다. 수치해석에 사용된 엔진의 제원은 Table 2에 나타내었으며, 계산 격자는 Fig.9와 같다. 계산은 크랭크 각도 180°부터 1°간격으로 계산을 수행하였다. Cavity 중심이 피스톤 중심으로부터 6.4mm 편심되어 있으며 분사 노즐 홀수는 6개이다. Fig.10에 분무 충돌각의 개략적인 형상을 표시하였다. 분무 충돌각은 Cavity 하단부에 부딪히는 55°, 62.5°의 경우와 Cavity 원형 부분에 부딪히는 75°의 경우이다. 스윌비는 각각 1.0, 2.3, 3.5인 경우에 계산을 수행하였다. Fig.11는 연료 분사후 2ms(13deg. BTDC), 2.5ms(10deg. BTDC)가 경과 되었을 때 각 Swirl ratio에 대하여 분무 충돌각 55°, 62.5°, 75°의 순으로 연소실내 연료 분포 형태를 공연비(A/F ratio) Contour로 나타내고 있다. Fig.11 (a)를

보면 충돌각이 55°와 62.5°의 경우는 분무가 넓게 퍼져 벽면근처의 공기와 혼합이 잘 이루어지고 있다. 그러나, 충돌각이 75°인 경우는 Fig.11 (a)에서 볼 수 있듯이 분사초기에 벽면에 충돌한 후의 액적들이 Cavity내 상단부로 주로 발달하고, 하단부로는 발달하지 못하기 때문에, Fig.11 (c)에서와 같이 분사 후기에까지 연소실내 원형 부분에서 연료가 희박한 영역이 존재한 것을 볼 수 있다. Fig.11의 (b)와 (d)는 세경우의 분무 충돌각 중 분무가 넓게 퍼져 벽면과의 혼합이 잘 이루어진 충돌각이 62.5°일 때 각 스윌비 변화에 따른 실린더 헤드면으로부터 8mm 떨어진 위치에서의 연료 분포를 공연비(A/F) Contour를 나타내고 있다. 스윌비가 1.0, 2.3인 경우 스윌비가 커질수록 분무가 넓게 퍼지는 것을 볼 수 있으나, 스윌비가 3.5인 경우와 같이 스윌비가 필요이상으로 클 경우는 분무 도달 거리 감소로 인한 벽면과의 충돌 지연으로 인하여, 연료 분산이 효율적으로 이루어지지 않고 있음을 볼 수 있다. 이는 연료 분무가 연소실 벽면에 충분히 충돌하는 경우에 비해 미립화가 충분히 일어나지 않는 것으로 보인다. Fig.12 (a)는 스윌비가 2.3일때 각각의 분무 충돌각에 대한 분무 평균 반경(S.M.R)를 나타내었으며, Fig.12 (b)는 분무 충돌각은 62.5°로 일정하고, 스윌비를 변화시켰을때 분무 평균 반경(S.M.R)를 나타내었다. Fig.12 (a)에서 분무 충돌각이 75°인 경우 연소실 벽면에 충돌하는 액적이 Cavity 원형부분에 접촉되어 액막을 형성하여 미립화가 잘 일어나지 않음을 볼 수 있다. 또한, 분사 초기에는 가장 먼저 충돌을 하는 분무 충돌각 55°의 미립화 정도가 가장 좋은 것을 볼 수 있으나, 세가지 경우의 분사각이 모두 충돌하는 343deg. 이후에는 분무 충돌각 62.5°가 미립화가 가장 잘 됨을 볼 수 있다. 분사 말기에는 피스톤이 상승으로 인한 실린더 체적 감소로 생기는 In-bowl 이나 Squish 유동의 영향 때문에 세가지 경우의 분무 충돌각 모두의 미립화 정도가 비슷함을 알 수 있다. Fig.12 (b)의 그래프는 분무 충돌각이 62.5°일 때 각 스윌비에 대한 S.M.R를 나타낸 것이다. 각 스윌비에 대하여 큰 차이는 없으나, 스윌비가 2.3인 경우의 미립화가 가장 좋은 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 분사각 62.5°, 스윌비 2.3인 경우에 최적의 공기-

연료 혼합 상태를 나타내었다.

Table. 2 Engine specification

Bore × Stroke (mm)	109×118
Connecting Rod Length (mm)	181
Compression Ratio	17.9
Crank Radius (mm)	59
Number of Nozzle Holes	6
Diameter of Nozzle Hole (mm)	0.28
Injection Duration	15deg.
Fuel Amount (mg/st.)	107.432
Wall Temperature (K)	550
Engine Speed (rpm)	1000

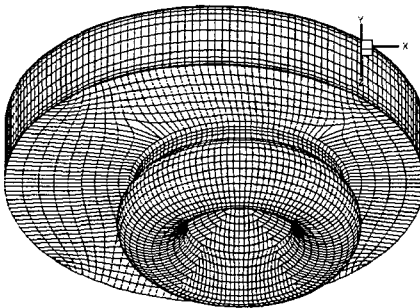


Fig. 9 Computational grid(grid number 44×44×26)

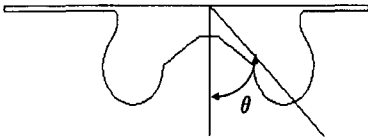
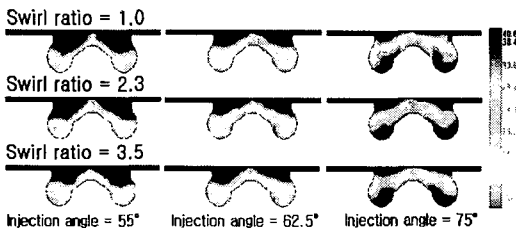
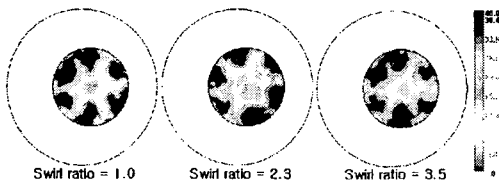


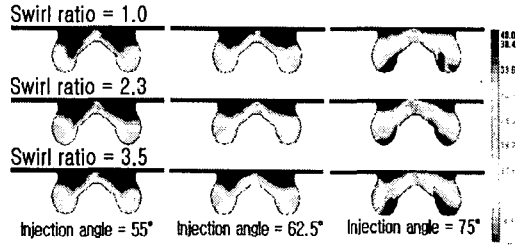
Fig. 10 Impinging spray angle



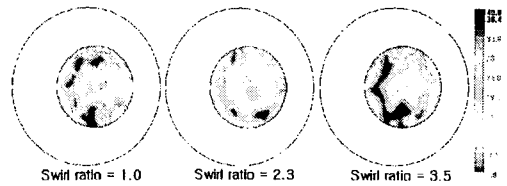
(a) vertical section(section x-x, 13deg. BTDC)



(b) Horizontal section
(section z=8mm, 13deg. BTDC)

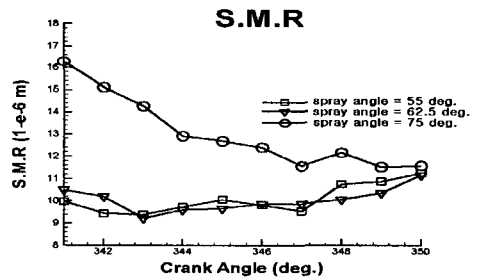


(c) vertical section(section x-x, 10deg. BTDC)

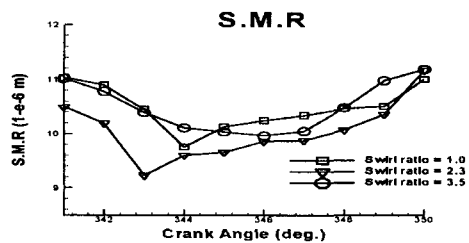


(d) Horizontal section
(section z= 8mm, 10deg. BTDC)

Fig.11 Contour of the air/fuel ratio



(a)



(b)

Fig.12 S.M.R.(Satuer mean radius)

4. 결론

본 연구에서는 GTT 코드를 이용하여 충돌을 고려한 분무와 스월이 존재하는 용기내의 분무

에 대하여 수치 해석을 행하여 기존의 실험 결과와 비교 분석을 통해 본 수치 해석의 유효성을 검증하였으며, 이 코드를 이용하여 디젤 연소실내에 분무 충돌각과 스월비 변화에 따른 디젤 충돌분무 거동에 대하여 비교, 분석하였다. 충돌분무가 연소실 벽면 어느 위치에 충돌하는냐에 따라 연료의 미립화가 달라지는 것을 볼 수 있었다. 일반적으로 분무 충돌각이 증가할수록 액적이 실린더 내에 넓게 퍼짐으로 미립화가 촉진되는데, 분무 충돌각이 55°, 62.5°의 경우에 분무 충돌각이 증가할수록 분무가 넓게 퍼져 벽면근처의 공기와 혼합이 잘 이루어지지만, 분무 충돌각이 75°에서와 같이 Cavity 원형 부분에 충돌이 일어나는 경우에는 연료가 Cavity 하단부까지 충분히 퍼지지 못한 것을 볼 수 있었다. 스월비가 증가하는 경우 충돌 분무가 넓게 퍼져 연료 분산이 증대되지만, 스월비가 필요 이상으로 클 경우 연료의 분산이 효율적으로 이루어지지 않아 미립화가 충분히 일어나지 않음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 스월비 2.3, 분사각도 62.5인 경우에 최적의 공기-연료 혼합 상태를 나타내었다. 수치 해석을 통해 분무 충돌각과 스월비 변화에 따른 디젤 엔진 실린더 내의 미립화 정도와 공기-연료 혼합상태의 경향성을 제시함으로써 연소의 최적화를 위한 연소실 설계에 활용할 수 있는 기초 자료로 제공하였다.

참고문헌

- [1] 최 성훈, "벽면 충돌 분사에 의한 DI디젤엔진 배기가스 특성의 수치해석적 연구" 한국자동차공학회논문집 제 6권 제 3호, PP.97~105, 1998
- [2] Gosman, A. D. et. al., "Heat and Mass Transfer in recirculating Flow", Academic Press, 103, 1969.
- [3] Spalding, D. B, and Pun, W. M., Imperial College Mech. Eng. Dept. Report, HTS/76/2. 1976
- [4] Amsen, A. A., et. al., "KIVA : A Computer Program for Two and Three Dimensional Fluid Flows with Chemical Reaction and Fuel Sprays". Los Alamos National Laboratory Report, LA-10245-MS, 1985.
- [5] Reitz, R. D. et. al., "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays", Atomization and Spray Technology, 3 (1987), 309.
- [6] Wakisaka, T. et. al., "Improvement of a Spray Model for Numerically Analyzing Fuel Spray Behavior", Proc. 13th Symp. on Internal Combustion Engines. JSAE/JSME, p.109, 1995.
- [7] Jayaratne, O. W. et. al., "The coalescence and bouncing of water drops", Proc. Roy. Soc. London A, 280 (1964), 545
- [8] Fujimoto, H. et. al., "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a flat wall", ICLASS - 88, A9-1, pp439-446, 1988
- [9] 박 병준, "분사된 액적들이 가열평판에 충돌 후 액적 분포 및 액막 형성에 관한 실험적 연구", 대한 기계학회 춘계학술대회 논문집 B, PP. 134 ~ 139, 1997.
- [10] Arthur H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, 1989
- [11] Naber, J. D. et. al., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE Paper 880107, 1988
- [12] Hiroyasu. H. et. al., "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber". SAE Paper 740715, 1974
- [13] Hiroyasu. H. et. al., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engine", Trans. JSAE, No.21, p.339, 1980