

디젤機關의 실린더內 流動 및 噴霧液滴 舉動의 數值的 研究(I)

장영준* · 박호준* · 전충환** · 김진원**

A Study on the Numerical Analysis of Behavior of Spray Droplets
and Internal Flow Field of Cylinder in Diesel Engine

Young-June Chang, Ho-Joon Park, Chung-Hwan Jeon and Jin-Won Kim

Abstract

In this study, we calculated gas flow fields and distribution of fuel droplet and mass fraction using the CONCHAS-SPRAY code which modified to execute in IBM PC and changed three important factors, injection rate pattern (BASIC, I, II, III), different bowl shape and spray type.

Especially vortices which be influenced by fuel-air mixing process, evaporation and flame propagation are generated more strongly in the bowl-piston type combustion chamber than in the flat-piston type. As the spray type changes, it is found that conical type produced large and strong vortices and fuel droplets are effectively diffused into the entire combustion chamber. As the injection rate pattern changes I, II, III based on BASIC type, we confirmed that End-of-Injection Effect strongly influence on droplets life time.

<p style="text-align: center;">기호설명</p> <p>c_p : Specific heat et contant pressure (cell quantity)</p> <p>c_v : Specific heat at constant volume(cell quantity)</p> <p>D : Species diffusivity(assume the same for all species)</p> <p>D_k : Sum of Stokes and aerodynamic drag contributions</p> <p>J : Heat flux vector</p> <p>K : Thermal conductivity</p>	<p>k_D : Dimensionless factor of SGC turbulent viscosity</p> <p>Le : Lewis number(Sc/Pr)</p> <p>N : Angular momentum per unit volume per unit time transfered from the spray droplets to the fluid</p> <p>P_v : Vapor pressure of species 1</p> <p>Pr : Prandtle number</p> <p>Q_s : Source term associated with the interaction between the spray droplets and fluid</p> <p>q_k : Rate of heat transfer to the droplet</p>
---	---

* 정회원, 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

- R : Index of which is accosiated coordinates
- R_g : Universal gas constant
- Re : Reynolds number
- r_k : Droplet radius
- Sc : Schmidt number
- U : Velocity vector of droplet
- u : Velocity vector
- W_k : Molecular weight of species k
- w_k : Swirl velocity of particle k
- w : Swirl velocity of fluid
- μ, λ : First and second viscosity coefficient
- ρ_k : Partial mass density of species k
- ρ_s : Rate of change of ρ_i due to spray evaporation of condensation
- σ : Viscous stress tensor
- δ_{ij} : Kronecker delta

상첨자(Superscript)

- * : Conditions at the droplet surface

하첨자(Subscript)

- 0 : Fluid mixture exclusive of species 1
- 1 : Species 1 of which the spray are composed
- k : Species k
- l : Phase of pure liquid

1. 서 론

디젤기관의 연소과정은 분무특성, 공기유동, 연소실 형상 등의 3가지요인에 크게 지배를 받고 있다. 즉, 흡입구를 통하여 들어온 공기의 복잡한 유동장인 고온, 고압의 연소실에 연료가 분사되어 연료의 미립화, 분산, 증발, 혼합기 형성, 착화 등의 물리적, 화학적 현상이 매우 복잡하게 연관되어 진행된다. 따라서, 디젤기관내의 연소현상을 근본적으로 조사하기 위해서는 실제기관에서의 공기유동과 분무에 대한 실험이 선행되어야 하겠으나 실험장치의 설계 및 제작의 어려움과 그에 따른 경제적, 시간적 문제로 인하여 짧은 기간내에 결과를 얻기에는 많은 어려움이 뒤따른다. 그러므로 이러한 제 문제를 해결하고 연소현상의 기초적인

연구를 위해서는 수치해석적 방법이 반드시 필요하게 된다. 최근의 수치해석은 컴퓨터의 기억용량과 처리속도의 발전에 힘입어 현상을 다차원적으로 받아들여 복잡한 현상에 대한 예측을 쉽게하여 연구의 효율면에서 큰 역할을 담당하고 있다.

최근의 연소실에 대한 다차원 유동장 수치해석 CODE 의 개발은 미국의 Los Alamos Lab. T-3 Group과 유국의 Imperial College 에 의해 주도되고 있다. 이들은 각각 KIVA-I, KIVA-II와 SPEED, EPISO의 3차원 수치해석 코드를 개발하였으며 이를 이용한 많은 연구결과도 보고되고 있다. 그러나 밸브를 통한 흡입과정이 고려된 복잡한 3차원 형상을 취급하는 것을 많은 기억용량과 계산시간을 요한다. 그러나 본 연구에서는 연소실내의 현상들은 거의 축대칭으로 일어나기 때문에 연소실을 2차원 축대칭 현상으로 근사시켜 수치해석을 행할 수 있고 흡입과정이 생략된 CONCHA-S-SPRAY⁽¹⁾코드를 이용하였다. 따라서 초기 유동장이 흡입과정이 아닌 압축행정 중의 피스톤 운동에 의해서만 결정되므로 실제와는 물리적으로 상당히 다른 결과를 발생시킬 수 있다. 그러나 압축행정 말기로 갈수록 축방향 유동은 피스톤 운동에 의한 난류의 강도가 지배적이므로, 흡입행정의 효과는 초기의 원주방향 유동장 즉, 선회류를 고려해 줌으로서 이를 보완하였다. 비록 압축행정말기의 연료분사시 연소실내 유동장이 실제 엔진과 다르다고 할지라도 분무의 성장, 증발 및 분무기동등의 분무전반에 관한 문제들은 잘 일치함을 알 수 있다.^{(2) (4)} 액적에 관해서는 기체상과 함께 서로 관통하고 상호작용하는 연속유체로 간주하는 방법과 이산액적으로 분무액적을 나타내는 방법이 있다. 분무를 연속체로 간주하면 인젝터 부근에 대한 이론적 해석이 아직 불완전하여 수치해석이 곤란해져 수치발산을 일으킨다. 따라서 증발이 있는 액체분무를 각 계산입자가 물리적 입자들과 비슷한 것으로 나타내는 이산입자 기법(Discret-Particle Technique)으로 나타내고, 입자의 반경과 그 밖의 속성들은 통계적 방법을 사용하여 표시한다.⁽²⁾

본 논문은 디젤기관의 성능향상 및 유해 배기물질의 저감을 위한 새로운 디젤기관의 개발과 설계에 필요한 기초자료를 제시하기위한 목적으로 수

치계산을 통하여 디젤기관의 분무 액적 거동 및 연소실내 공기유동을 밝히고자한다. 디젤기관의 연소실 형상에 따른 실린더내 유동 및 분무액적의 거동을 밝히기 위하여 피스톤 헤드 모양을 Flat와 Bowl Type으로 구분하였으며, 분무특성은 분무 Type을 Solid와 Conical Type에 따라, 그리고 분사율 특성에 따른 연소실내의 공기유동과 연료 분무 특성을 조사하기 위해 Gate형의 일정한 분사율(BASIC Type)을 가진 기존의 CONCHAS-SPRAY 코드를 기본으로하여 End-of-Injection 영향이 고려된 세 종류(I, II, III, Type)의 분사율 모델을 첨가하고, 대형이 아닌 일반 개인용 컴퓨터에서도 수행가능하도록 프로그램을 보완 수정하였다. 각 분사율의 모델과 피스톤 헤드, 분무 Type에 대해 유동장의 강도 및 분무액적의 분포, 질량비율의 변화를 조사하였다.

2. 2차원 비정상 압축성 유동해석

2차원 축대칭의 비정상 압축성 공기유동과 분무액적의 수치해석을 위해 연소실내 기체에 대한 방정식들과 분무액적의 운동에 대한 방정식이 필요하다. 이들 지배방정식을 수치적으로 해석하기 위해 다음과 같은 가정들이 적용된다.

연소실내 유동에 관계된 가정

- (1) 유체는 이상기체의 혼합물이라 가정한다.
- (2) 압력구배에 의한 확산은 무시한다.
- (3) 체적력, 복사, Bulk Viscosity는 무시한다.
- (4) 입자 상호간의 충돌이나 합체가 일어나지 않는다.
- (5) 분무액적의 그룹에서 각 액적의 크기, 온도, 밀도는 동일하다.
- (6) 분무는 액적들에 의한 체적변위가 무시되고 입자의 운동의 공기 역학적 힘에 의해 지배되는 충분히 열은 분무이다.

2-1. 연소실내 유동해석

각 성분 k의 연속방정식(액적은 제외)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{1}{R} \Delta \cdot (R \rho_k u)$$

$$= -\frac{1}{R} \Delta \cdot [R \rho D \Delta (\rho_k / \rho) + \rho_s \delta_{k1}] \quad (1)$$

총유체밀도 ρ 에 대한 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{R} \Delta \cdot (R \rho u) = \rho_s \quad (2)$$

단, ρ_s 는 분무 액적의 질량을 제외한 유체의 전체 질량밀도이다.

운동량방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{1}{R} \Delta \cdot (R \rho u u) \\ = -\Delta p + \frac{1}{R} \Delta \cdot (R \sigma) \\ - \frac{(\sigma_0 - \rho w^2)}{R} \Delta R + F + \rho G \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, G 는 단위질량당의 외력, 그리고 F 는 분무액적에서 유체로 전달되는 단위체적당의 단위시간당의 운동량이다.

각운동량방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(R \rho w) + \frac{1}{R} \Delta \cdot (R^2 \rho w u) \\ = \frac{1}{R} \Delta \cdot (R \tau) + N \end{aligned} \quad (4)$$

내부에너지방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho I) + \frac{1}{R} \Delta \cdot (R \rho I u) \\ = -\frac{\rho}{R} \Delta \cdot (R u) + \sigma : \Delta u + \tau \cdot \Delta (w/R) \\ + \frac{\sigma_0}{R} u \cdot \Delta R - \frac{1}{R} \Delta \cdot (R J) + Q_s \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 기체의 물성치는 이상기체 상태식에서 다음과 같이 구해진다.

$$p = R_g T \sum_k (\rho_k / w_k) \quad (6)$$

$$I(T) = \sum_k (\rho_k / \rho) I_k(T) \quad (7)$$

$$c_v(T) = \sum_k (\rho_k / \rho) c_{vk}(T) \quad (8)$$

$$h_k(T) = I_k(T) + R_g T / w_k \quad (9)$$

2-2. 분무액적의 방정식

분무에 대한 운동방정식은 이산액적에 대한 Lagrangian 형태로 주어진다. 분무액적 k의 속도는 다음과 같다.

$$U_k = \frac{dX_k}{dt} = U_k i + V_{kj} \tag{10}$$

액적 k의 질량 m_k 는 다음과 같다.

$$\frac{dm_k}{dt} = \left(1 - \frac{y_0}{y_0^*} \right) \frac{\left(\frac{2+0.6(Re^* Sc^*)^{1/2}}{2+0.6(Re^* Pr^*)^{1/2}} \right) q_k Le^*}{y_1(h_1 - h_1^*) + y_0(h_0 - h_0^*)} \tag{11}$$

입자 k의 속도식은 다음과 같다.

$$\frac{dU_k}{dt} = \frac{D_k}{m_k}(u - U_k) + \frac{W_k^2}{R} VR + G \tag{12}$$

$$D_k = 6\pi\mu r_k + \frac{1}{2} \pi r_k^2 C_D [(u - U_k)^2 + (v - V_k)^2 + (w - W_k)^2]^{1/2}$$

입자 k의 선회속도는 다음과 같다.

$$\frac{dW_k}{dt} = \frac{D_k}{m_k}(w - W_k) - \frac{U_k W_k}{X_k} \tag{13}$$

입자 k에 대한 에너지균형식은 다음과 같다.

$$m_k \frac{dH_k}{dt} = L(T_k) \frac{dm_k}{dt} + q_k \tag{15}$$

여기서, $H_1(T)$ 는 온도 T에서 순수 액체의 비엔탈피이다. 잠열 $L(T_k)$ 는 $L(T_k) = h_1^* - H_k$ 로 주어진다.

3. 수치해석 기법

3-1. 격자계 및 격자 침식 알고리즘

연소실내의 유체유동은 피스톤의 시간적인 움직임에 따라 영향을 받는다. 따라서 유동을 올바르게 해석하기 위해 경계조건도 이동해야한다. 즉, 시간이 변함에 따라서 경계조건과 격자가 이동하는 것이 Lagrangian 격자계이고, 고정된 경계조건과 격자계를 갖는 것이 Eulerian 격자계이다. 실

제 엔진 연소실은 피스톤이 지나가는 행정구간과 고정된 실린더 헤드 부분이 있으므로, 본 수치해석에서는 이 두가지 격자개념을 혼합한 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 격자계가 사용된다.

Lagrangian 방법으로 계산을 하다보면 크랭크 각도가 상사점에 가까워질수록 격자가 조밀해지고, 따라서 시간간격은 더욱 작아져 계산을 더 이상 수행할 수가 없게된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 격자침식알고리즘을 도입한다. 즉, 연소실 경계의 일부를 형성하는 피스톤은 Moving Boundary이므로 피스톤의 운동에 따라 격자의 모양과 위치를 변화시켜, 축방향의 격자가 일정한 경우 상사점에 가까워 질수록 격자 간격이 좁아지게되어 계산상의 안정도를 저해하는 수치적 문제가 발생한다. 따라서, 피스톤의 상하운동에 따라 적절한 연소실의 위치에서 격자를 하나씩 삭제 또는 첨가시키는 방법을 사용한다. Fig. 1는 계산에 사용된 격자계를 피스톤모양에 따라서 나타낸 것이다.

3-2. 난류 모델링

유동장을 결정하는 가장 중요한 난류모델이다. 왕복기관의 반복작동에서는 난류성분 자체에 대한 일괄된 정의를 내리기 어려우며 각 사이클에서의 연소실 압력변화나 순간속도를 비교해 보면 사이클 간의 변화가 크기 때문에 엄밀한 의미에서 Cyclic Operation으로 보기가 어렵다. 이에 난류 모델링의 관심은 난류 확산계수 결정에 모아지고 이를 결정함에 있어서 본 연구에서는 FFM(Full Field Modeling)과 LES(Large Eddy Simulation)의 절충형태인 SGS(Sub Grid Scale Model)을 사용한다. 이 모델은 Derdodff에 의해 제시되었다.⁽⁴⁾

$$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \rho k_b^2 \Lambda^2 [D_{11}^2 + D_{22}^2 + D_{33}^2 + 2D_{12}^2 + 2D_{13}^2 + 2D_{23}^2]^{1/2} \tag{16}$$

$$D_{11} = 2 \frac{\partial u}{\partial x}, \quad D_{22} = 2 \frac{\partial v}{\partial y},$$

$$D_{33} = -\frac{2}{R} u \cdot \Delta R, \quad D_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

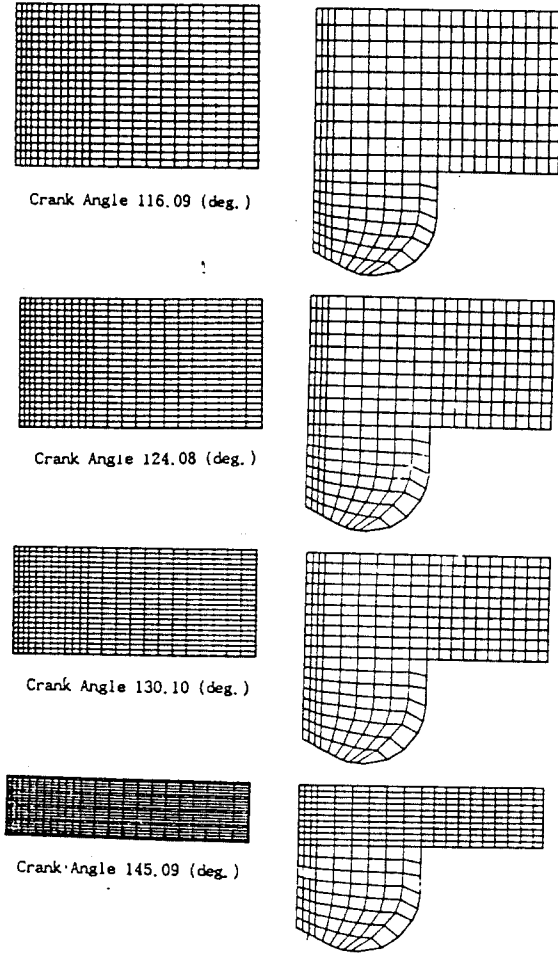


Fig. 1 Grid formats w.r.t crank angles

$$D_{13} = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{w}{R}, \quad D_{23} = \frac{\partial w}{\partial y}$$

k_D 는 무차원 상수($k_D \sim 0.17$)이고, Λ 는 셀의 가장 긴 면의 길이였다.

앞절의 방정식들은 층류유동에 대한 적절한 형태로 주어졌다. 난류유동을 다루기 위해서는 이들 방정식들에 적절한 평균화 작업이 필요하다. 이러한 평균법에서, 유동변수들은 평균량과 섭동량 성분들로 나누어진다. 만약 평균량들이 질량가중값 (Mass-Weighted Averaging Procedure) 들이라면, 평균화방정식은 상당히 간단해진다. 섭동항들은 보통 유속-구배 근사법 (Gradient-Flux

Approximation)으로 모델된다. 이렇게 평균화되고, 평균화방정식들은 난류에너지 Flux가 온도구배 대신에 내부에너지 구배에 비례하는 것을 제외하고는 층류 유동방정식과 비슷하다. 따라서 이러한 근사법에서 평균화된 난류방정식은 층류방정식과 동일한 것으로 된다. 그러므로 전달계수들(즉, 점성, 열전도율, 중화산도)은 난류 Fluctuation에 기인한 추가적인 전달량으로 층류에 대한 값보다 큰 적절한 난류값으로 단순하게 바뀌진다. 그러므로 유동이 난류인 경우, 단지 층류의 전달계수에 난류의 것을 더하면 앞 식들은 사용할 수 있다.

3-3. 벽면 경계층 처리

엔진 연소실내의 유동을 포함한 대부분의 유동장에서 벽면근처의 속도경계층이 매우 얇아 실제의 계산격자로는 해석하기 어렵다. 그러나 이러한 경계층은 수치해석에서 중요한 경계조건이 되는 운동량 결정하므로 반드시 필요하다. 따라서 벽면근처의 경계층 해석을 위한 근사적 방법으로 다음과 같은 난류 벽면 법칙을 이용한다.⁵⁾

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{yu_*}{\nu} \right) + B \quad (17)$$

여기서 u_* 는 $\tau_w = \rho u_*^2$ 으로 주어지는 전단유속이다.

위 식을 유한차분 격자계에 적용하기 위해서는 벽면으로부터의 첫번째 격자점이 벽면 법칙의 영역에 존재한다고 가정하여 이점에서의 u 와 r 을 식 (17)에 대입하여 u_* 를 구하고 다시 τ_w 를 계산한후 이 벽면전단 응력을 경계조건으로 적용한다. 그러나 u_* 를 반복계산으로 구해야 하므로 식 (17)의 로그항 내에 있는 u_* 를 1/7 법칙에 의한 근사식 u_*^s 로 대체한다.⁽¹⁾⁽⁶⁾

$$\frac{yu_*^s}{\nu} = 0.15 \left(\frac{yu}{\nu} \right)^{7/8} \quad (18)$$

이를 (17)식에 대입하면 다음의 형태를 얻는다.

$$\frac{u}{u_*} = 0.75 + 2.19 \ln \left(\frac{yu}{\nu} \right) \quad (19)$$

3-4. 이산 입자 기법

주위 기체와 분무의 상호작용을 통계적 방법으로 Monte Carlo Method로 취급한다. 분무는 이산 계산 입자(Discrete Computational Particle)로 이루어지고 그 입자들은 동일한 크기, 속도, 그리고 온도등은 분포함수에 의해 샘플링되고, 개개의 입자들은 주위기체와 상호작용하여 질량, 운동량 그리고 에너지를 교환한다.

이러한 분포함수들은 인젝터의 크기 혹은 속도 분포함수들로부터 샘플링된다. 랜덤 변수 $x(x_1 \leq x \leq x_2)$ 의 분포함수를 $f(x)$ 라 하면, 이 함수는 $dN=f(x)$ 로 정의된다. 즉, 값 x 에 대한 미소간격 dx 에서의 액적의 수로 정의된다. 랜덤변수를 $y = \int f(x)dx$ 로 정의하면 $dN=dy$ 이다. 따라서 액적의 수는 변수 y 에 대해 일정하게 분포한다. 보통 0에서 1의 범위 안에서 균일한 분포를 갖는 랜덤수 발생기를 이용한다. y 를 얻기위해 분포함수를 샘플링해서 측정하고 그것을 변환하면 $f(x)$ 에 따른 분포를 얻게 된다. ⁽¹⁾⁽²⁾

4. 수치 계산 모델

4-1. 분사율

일반적으로 노즐형태에 있어서는 분구공의 갯수, 분구공의 직경, 노즐형태에 따른 해석적 연구가 수행되는 것이 보통이지만, 본 연구에서는 분사율에 따른 분무의 거동에 대해 계산을 행하였다. 특히 디젤분무에 있어서 분사 말기의 분사율의 형상은 유해 배기가스 발생에 가장 지배적인 영향(End-of-Injection Effect)을 미치므로, 이러한 분사율 모델의 변화가 실린더내 유동장 및 분무 성장 거동에 미치는 영향을 밝혀 줄 것이다. T. W.Kuo는 여러 종류의 분구공과 분사율에 대해서 분사 말기의 영향이 분무에 미치는 영향등에 초점을 두어 수치해석한 결과를 보고하고있다. ⁽⁶⁾ 본 연구에서는 Fig. 2의 4종류의 분사율 모델을 가정하여 각 모델에 따른 연소실내의 유동장의 속도와 액적의 위치, 속도, 갯수, 농도등을 구하였다. <BASIC>은 CONCHAS-SPRAY 코드에 적용된 간단한 Gate 형태의 분사율이고, TYPE<

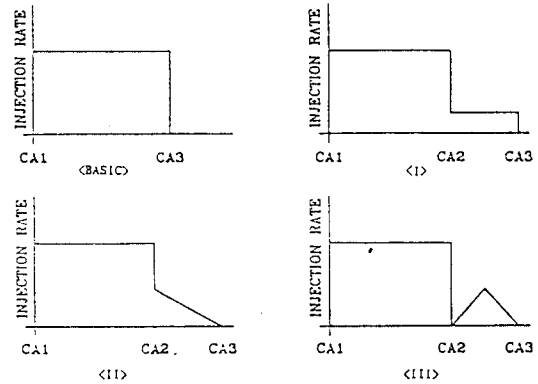


Fig. 2 Models of the injection rate

I>, <II>, <III>는 본 연구에서 변형된 Step형, 선형 감쇠형, 이차분사형 분사율 선도를 나타낸다. 4종류 모두 같은 분사량이다.

4-2. 디젤 분무형태

본 수치해석에 적용된 분무는 Fig. 3도 같은 단공과 다공홀의 노즐형태에 대해 수치모사를 하였다. 단공홀의 경우 분부각은 약 30°, 자우다 평균경(SMD)은 20 μ m로 하였다. 또한 다공홀의 경

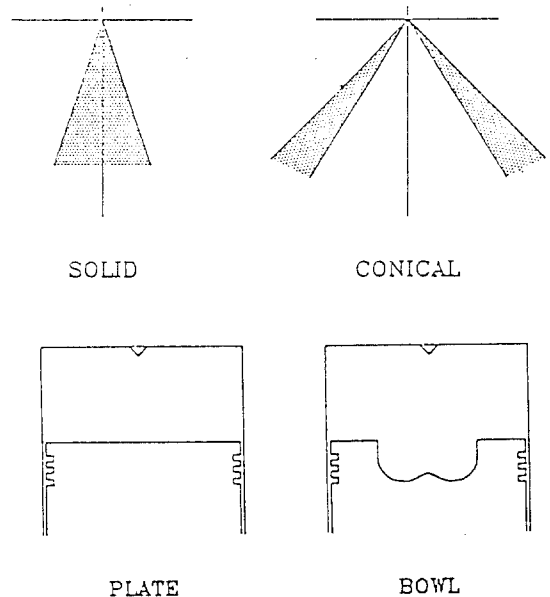


Fig. 3 Models of the spray and piston head type

우 분무각은 75°의 중심각에서 15°로 분사되고 SMD는 단공홀의 경우와 같다. 여기서, 2차 분사의 분사량이 전체 분사량의 10%를 넘지 않는다는 가정하에서 분사시기를 조정하였다. 분무각 및 액적의 크기에 대한 분포함수, SMD, 분사율등의 분무특성과 매 시간 간격당 계산격자에 들어오는 분무액적 그룹의 갯수가 결정되면 (0, 1)의 범위에서 Random Number를 결정하여 그 그룹의 속도, 방향, 크기를 계산한다.

4-3. 피스톤 형상

디젤기관에서 연소실의 공기유동을 촉진시키기 위해서는 피스톤의 형상이 중요한 요인이 된다. 연소실내도 들어온 공기는 피스톤 운동과 흡입시 발생된 와류가 형성되어 있으며, 피스톤헤드 및 실린더 상부의 모양에 따라 유동이 촉진된다. 본 연구에서는 Fig. 3와 같이 2종류의 피스톤형상을 갖는 직접분사식 디젤엔진 연소실에 분사시킨다.

5. 계산 방법 및 조건

5-1. 수치계산 순서

엔진 연소실내 피스톤의 움직임에 의해 유체유동의 시간에 따른 변화가 생기게 되며 이러한 현상을 수치해석하기 위해서는 경계조건이 이동하여야 하며, 이때 피스톤의 움직임에 따른 격자점의 순간적인 이동이 매 계산시 마다 이루어져야 한다.

다음은 한 사이클의 계산 순서이다.

- (1) 연소실의 기하학적 형상 및 물성치등 고정된 값 입력 그리고, 초기조건 및 경계조건 입력
- (2) 격자생성 및 셀(Cell)변수의 계산
- (3) 시간간격(Δt)의 계산 및 이에 따른 피스톤 운동 계산
- (4) 운동량방정식으로부터 액전의 증발, 운동량 확산을 계산하고 에너지방정식으로부터 에너지 확산 계산
- (5) 증발에 의한 새로운 변화량을 계산
- (6) 압력구배에 의한 속도항 계산후 압력, 밀도, 속도장의 반복계산
- (7) 격자점을 새로운 Lagrangian위치로 이동
- (8) 유체운동에 상대적인 격자점의 이동으로부터

터 생겨나는 질량, 운동량, 내부에너지 전달량을 계산

5-3. 경계조건

경계조건으로서는 벽면에서의 속도와 온도를 필요로 한다. 벽에서의 속도경계조건으로서 Wall Shear Stress를 결정하기 위해서는 많은 수의 계산격자가 필요하게 되므로, 이를 피하기 위해 경계층 내의 속도분포를 대수함수로 대체하는 Wall Function Method과 No Slip Boundary를 적용한다. 온도 경계조건은 실린더 벽과 피스톤 헤드에 대해 일정하게 주어진다.

6. 계산 결과 및 고찰

본 연구의 계산은 Crank Angle 90.0° ABDC에서 시작하여 145.2° ABDC까지 행하였다. 실제 디젤기관에서 연료 분사는 15.0° BTDC에서 시작해서 20.0° BTDC사이까지 일어나지만, 본 연구에서는 디젤 분무 액적의 상세한 형성과정을 관찰하기 위해서 실제 분사 시기와는 다르게 118.0° ABDC에서 연료를 분사시키고 각 분사율 모델에 따라서 130.67°와 134.67° ABDC에서 끝낸다. 엔진회전수 1600 RPM에서 분사 개시와 분사 종료 Crank Angle에 대한 분사 기간을 시간으로 환산하면 분사율 Type에 따라 약 4.24msec와 4.65 msec로 된다.

6-1. Piston Head Type의 영향

실제 디젤기관에 적용되는 Piston Head의 형태는 다양하지만 대별하면 Flat Type과 Bowl Type으로 나눌수 있다. Flat Type은 분무된 액적의 Piston Head에 대한 충돌효과는 크지만 분무가 충분히 발달되지 못한다는 점이있고, Bowl Type은 피스톤과 실린더 헤드 상부의 스퀴시(Squish)유동을 활성화시킴으로서 유동장 전체에 크고 강한 와류장을 형성시킬 수 있다는 점을 가지고있다. 분무가 존재하는 연소실 중앙 부위는 유동을 자세히 보기위하여 격자를 잘게 구성하였고 벽면근처의 스퀴시 유동부위는 크게 하였다. 여기서 사각 형태의 연소실 면적은 같으나 Bowl Type은 Bowl 면적이 첨가되므로서 압축비가 약

간 떨어진다.

분사율은 <Basic> Type, 분무는 Solid Type을 기준으로 할때 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6는 Flat, Bowl Type의 각 형태의 분무성장 추이와 연소실내 유동장의 변화 과정 및 연료 농도 분포를 나타낸 그림이다. 내연기관의 연소에 가장 지배적인 연료 공기 혼합에 스퀴시 유동이 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있는데, Fig. 4에 나타난 유동장의 속도 벡터를 비교해 보면 초기에 동일한 유동 조건이지만 Bowl Type에서 더 강한 스퀴시 유동이 발생되고 그 강도는 분무가 피스톤 헤드에 부착되는 순간에 최대에 도달된다. 특히, Bowl 이 스퀴시 유동을 형성할 수 있는 원인을 제공함으로써,

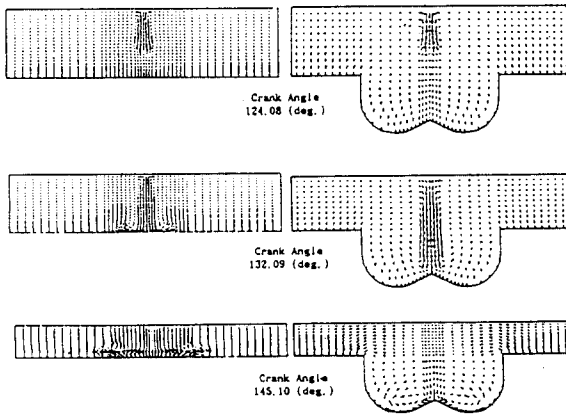


Fig. 4 Comparison of piston head type by velocity vector profile

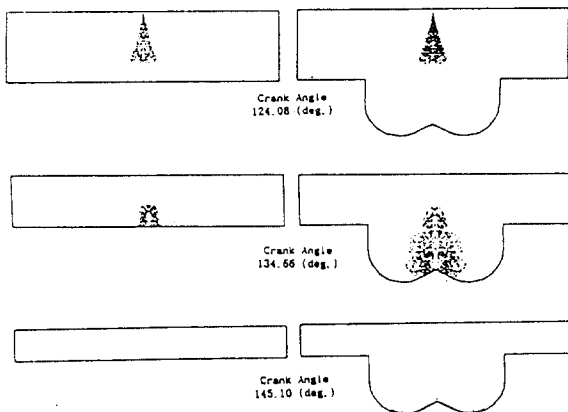


Fig. 5 Comparison of piston head type by droplet distribution

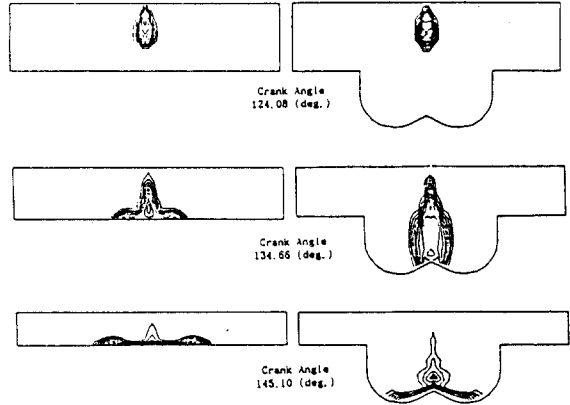


Fig. 6 Comparison of piston head type by fuel mass fraction

각도 145.10°에서 분무는 충돌후 스퀴시 유동을 촉진시키는 큰 와류를 Bowl 하단부에 형성하고 있지만, Flat Type에서는 충돌에 의해 역 스퀴시 유동이 발생됨을 알수 있다.

Fig. 5은 분무 성장 추이를 나타낸 것으로 Flat Type은 분사후 충돌효과가 크고, Bowl Type은 Flat Type에 비해 분무 성장 거리가 짧을 알수있는데, 각도 145.10°에서 Bowl Type이 더 많은 액적이 존재함으로서 Flat Type의 피스톤 헤드에 액적들이 많이 부착 했음을 알수 있다. 따라서 분무의 증발 현상중 Bowl Type은 고온 고압의 내부유동에 좌우되고 Flat Type은 피스톤 헤드면의 열전달에 의한 증발효과가 짧을 알수있다.

Fig. 6은 연료 액적과 공기가 혼합됨으로서 연소실내 연료 질량 분포를 시간에 따라 나타낸 그림이다.

6-2. 분무 Type의 영향

본 연구에서 계산한 분무 Type은 단공 Nozzle Type과 다공 Nozzle Type이다. 단공노즐인 경우 분사각이 30°로 연소실에 연료가 분사되고, 다공노즐인 경우 분사각은 75°이고 분무각은 15°이다. 분무 형태는 연소실내 혼합기 및 유동장 형성에 중요한 인자로서, 분무에 의한 유동장내 와류 및 스퀴시 유동의 강도, 또한 연료 액적들이 연소실내 퍼짐의 정도등을 결정한다. 분사율 <BASIC> Type, Bowl Type 피스톤 헤드를 기준으로 Fig.

7, Fig. 8, Fig. 9는 단공노즐 및 다공노즐에 대한 각각의 유동장의 속도 벡터, 분무의 성장 추이 및 연소실내 연료 농도분포의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 7을 비교해 보면 다공노즐이 단공노즐에 비해 유동장 초기부터(각도 130, 10°)큰 스퀴시 유동을 형성시키고 있으며, Bowl의 상단부에 상당히 큰 두개의 와류가 형성되고 이 와류장은 분무와 함께 하류로 내려갈수록 그 강도가 크짐을 알수 있다. 특히 분사가 끝난 직후 연소실 중앙부에는 여전히 피스톤 운동에 의한 상류방향 유동이 와류에 의해 더욱 증폭되어 역 스퀴시 유동을 일으키려는 경향을 띠고 있다. 다공 노즐이 Bowl의 영향을 효과적으로 활용할 수 있음을 알수 있다. Fig. 8은

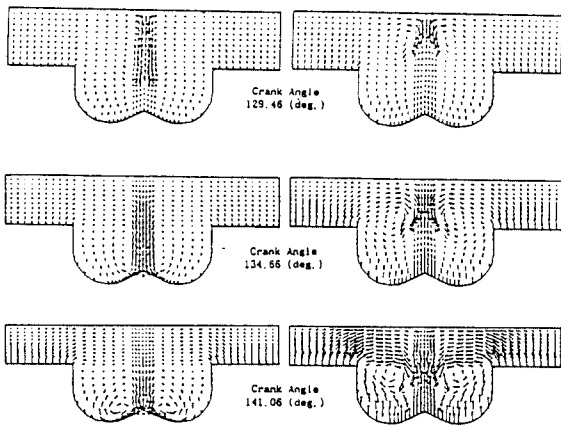


Fig. 7 Comparison of spray type by velocity vector profile

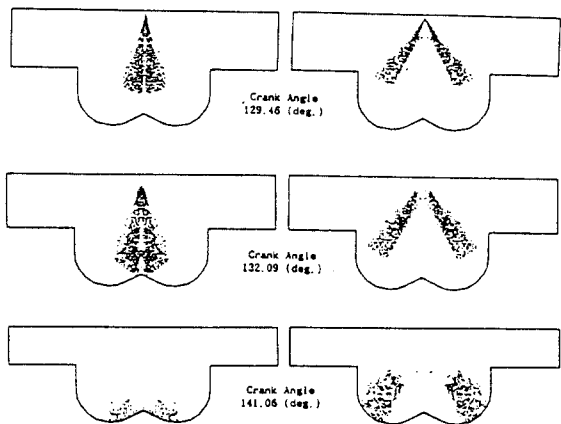


Fig. 8 Comparison of spray type by droplet distribution

분무의 성장 추이를 나타낸 것으로 다공노즐이 단공노즐에 비해 분무도달거리가 길어지므로서 충분한 증발시간을 가지게 되므로 Bowl 내부에 넓게 잘 퍼져 있음을 보여준다. Fig. 9는 질량 분포를 나타낸 것으로 다공노즐이 단공에 비해 분무비행거리가 길어져 충분한 성장이 이루어져 피스톤 헤드에 분무액적이 부착되는 효과가 적음을 알수 있다.

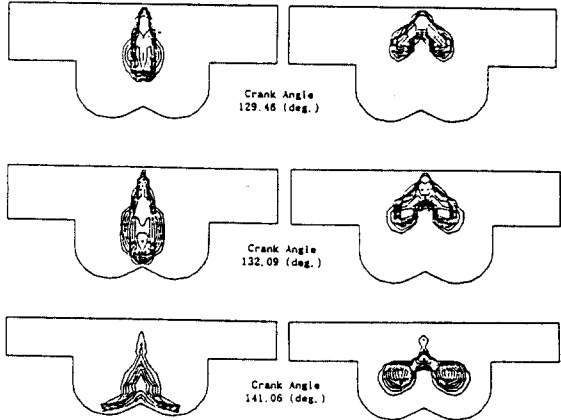


Fig. 9 Comparison of spray type by fuel mass fraction

이와같이 다공 노즐이 단공노즐보다 연소실의 혼합기 형성을 촉진시킴을 알수 있고, 속도벡터, 액적분포와 연료질량 분율을 비교하면 다공노즐측이 연소실의 공기 유동을 촉진시키고 액적분포와 질량분율도 훨씬 양호해져 연소에 알맞은 혼합기를 형성시키는 것을 예측할 수 있다.

6-3. 분사율 변화의 영향

<BASIC> Type을 기본으로 분사계의 특성에 따라 나타날수 있는 각종의 <I>, <II>, <III> Type은 분사말기에 각각 다른 형태의 분무특성을 가지므로서 해서 속도벡터, 액적분포와 연료 질량 분율을 비교해 보았다.

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 Bowl Type 피스톤 헤드에 대한 그림이다. Fig. 10은 분사율 변화가 유동장에 미치는 영향을 비교해 보면 각도 129.42°까지는 거의 변화가 관측되지 않지만 130.67°이후에서는 <I>, <II>, <III> Type의 분사율 모델에서는 분사가 지속되기 때문에 분무 액

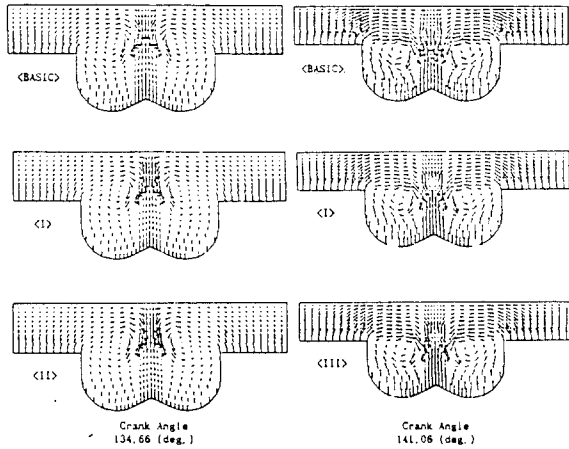


Fig. 10 Comparison of injection rate type by velocity vector profile

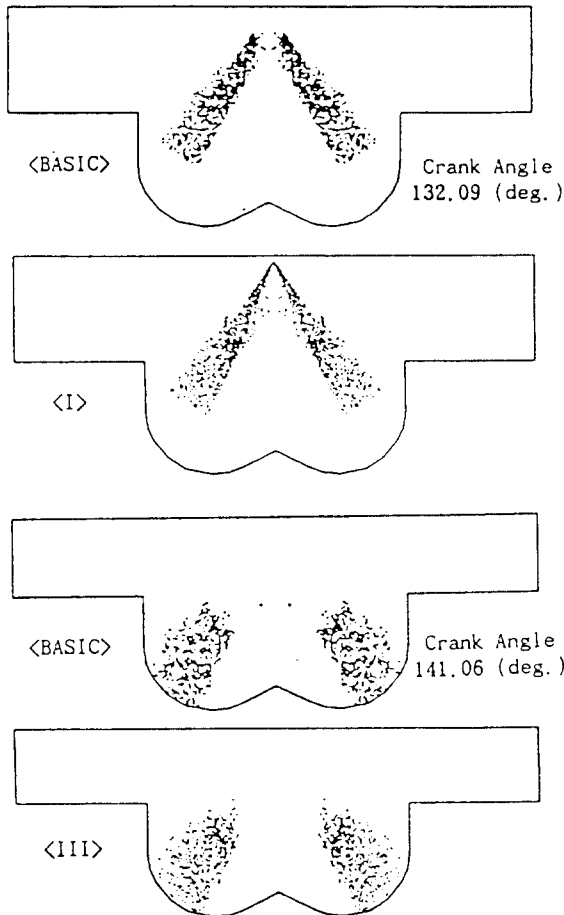


Fig. 11 Comparison of injection rate type by droplet distribution

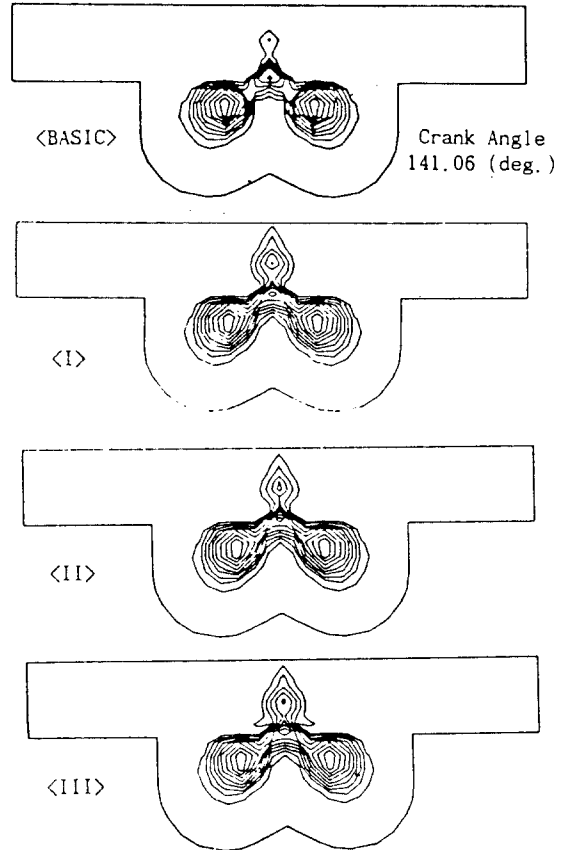


Fig. 12 Comparison of injection rate type by fuel mass fraction

적들은 계속 분사되고 있다. 134.66°에서 <BASIC> Type는 분사가 끝난상태이므로 실린더 헤드 중앙부에 스퀴시 유동을 흡수하고 있지만, <I>, <II>에서는 아직 분무에 의한 유동이 계속되고 있다. Fig. 11는 분무액적의 상태를 나타낸 것으로 132.10°에서 <BASIC> Type는 분사가 끝났지만 <I>는 아직 계소됨을 보여주고 있고, 이 때문에 141.06°에서는 <BASIC>보다는 <III>가 더 많은 액적이 길게 존재해 있음을 보여준다. Fig. 12는 141.06°에서 네종류의 분사율 모델의 연료질량분포를 나타낸 것으로 <I>, <II>, <III>는 실린더 헤드 상부에 상당한 연료가 남아 있음을 보여주고 있으며, 특히 <III>대해 조사해 보면 이차분사형의 영향이 약간 나타나 있음을 알수 있다.

Table. 1 Specifications of Simulated Engine and Initial Condition

ENGINE SPECIFICATION	TYPE		D.I ENGINE
	BORE		99 mm
	STROKE		95.5 mm
	CONNECTING ROD		163 mm
	CLEARANCE		1.5 mm
	R P M		1600
INITIAL CONDITION	TEMPERATURE	AIR	438.0 K
		WALL	400.0 K
	FUEL	DENSITY	0.7025
		TEMPERATURE	367.0 K
	INJECTION	START ANGLE	A B C D 118 °
		END ANGEL	A B D C 130 °
	SAUTER MEAN RADIUS(SMR)		

7. 결 론

피스톤 헤드 Type, 분무 Type, 분사율 모델을 도입하여 디젤기관의 실린더內 유동 및 분무 액적의 거동에 관해 수치적 해석을 행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 피스톤의 형태는 스쿼시 유동을 활발하게 일으키며, 피스톤 헤드면에 부착효과가 적고, 충돌후 큰 와류 유동장을 형성하는 Bowl형태가 효과적임을 알았다.

(2) 분무형태는 유동장 내에 강한 와류와 역 스쿼시 유동을 일으키며 공기와의 혼합효과가 큰 다공노즐이 적합하다. 특히 Bowl형태의 피스톤에서는 큰 와류장이 형성된 Bowl 안에 분무가 형성됨으로서 Flat 형태가 가진 충돌효과 보다도 효과적임을 밝힐수 있었다.

(3) 분사율 모델을 도입하여 분사계의 이상현상으로 일어나는 후분사 효과를 수치적으로 예측할 수 있었다. 분사율 모델은 < I >, < II >, < III > 순으로 액적의 Life Time이 커졌으며 Bowl에 비해 Flat형태가 큼을 알수 있었다.

(4) 분사이후 분무의 거동에 대해서 물리적으로는 의미있는 결과를 얻었다. 앞으로 실제기관과

같은 조건하에서 연소과정이 포함된 계속적인 연구가 요구된다.

참고문헌

- 1) L.D.Cloutman, et al., "CONCHAS-SPRAY : A Computer Code for Reactive Flow with Fuel Sprays", Los Alamos National Lab. report, LA-9294-MS., 1982.
- 2) J.K.Dukowicz, J. Comput. Phys., 35, pp.229-253.
- 3) S.H.El Tahry, "K - e Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows", J. Energy, Vol.7, No.4, pp.345-353, 1983.
- 4) S.H.El Tahry, "A Numerical Study on the Effects of Fluid Motion at Inlet-Valve Closure on Subsequent Fluid Motion in a Motored Engine", SAE 820035, 1982.
- 5) J.E.Deardorff, "On the Magintude of the Subgrid Scale Eddy Coefficient", J. Comput. Phys., Vol.7, pp.120-133, 1971.
- 6) H.Schlichting, "Boundary Layer Theory", 6th ed., McGrow-hill, 1968.
- 7) T.W.Kuo, R.C.Yu, "Modeling of Transient

- Evaporating Spray Mixing Processes Effect of Injection Characteristics”, SAE 840226, pp. 1-14, 1984.
- 8) T.W.Kuo, S.M.Shahed, “A Numerical Study of the Transient Evaporating Spray Mixing Process in the Diesel Environment”, SAE 831735, pp.71-85, 1983.
 - 9) T.D.Butler, P.J.O'Rourke, “A Numerical Method for Two Dimensional Unsteady Reacting Flows”, Los Alamos
 - 10) T.W.Kuo, F.V.Bracco, “Computation of Drop Sizes in Pulsating Sprays and of Liquid-Core Length in Vaporizing Sprays”, SAE 820133, pp.528-547, 1982.
 - 11) K.Takeuchi, J.Senda, M.Shikuya, “Transient Characteristics of Droplet Size Distribution in Diesel Fuel Spray”, SAE 830449, pp.1-14, 1983.
 - 12) A.D.Watkins, A.D.Gosman, B.S.Tabrizi, “Calculation of Three Dimensional Spray Motion in Engine”, SAE 806468, pp.1-22, 1986.
 - 13) K.R.Beshay, A.D.Gosman, “Assessment of Multi-dimensional Diesel Spray Predictions”, SAE 861570, pp.928-944, 1986.
 - 14) A.A.Amsden A.D.Butler, P.J.O'Rourke, “The KIVA-II Computer Program for Transient Multidimensional Chemically Reactive Flows with Sprays”, SAE 872072, pp.373-383, 1987.
 - 15) C.Arcoumanil, E.Cossal, G.Paal, “Transient Characteristics of Single-Hole Diesel Sprays”, SAE 890314, pp.1-17, 1989.
 - 16) C.T.Crowe, “Review-Numerical Models for Dilute Gas-Particle Flows”, J. Fluids Eng., Vol.401, pp.297-303, 1982.
 - 17) Y.J.Choi, “보울형상과 선회비에 따른 디젤기관 실린더내의 유동장 해석”, J.KSAE Vol.13. No.2, 1991