

〈論 文〉

원통형 연소실내 분무된 액적군의 화염전파에 관한 수치해석

이영집* · 백승욱* · 김택영*

(1990년 3월 28일 접수)

Flame Propagation through Liquid Droplets inside a Cylindrical Combustor

Yeong Jib Lee, Seung Wook Back and Taik Young Kim

Key Words : Two Phase Spray Combustion(이상 분무연소), Spray Combustion(분무연소), Spray Injection Angle(액적 분사각), Droplet Size(액적크기), Swirl Velocity(기체각 속도)

Abstract

A Numerical computation of unsteady two-dimensional flame propagation through thin spray droplets injected into the cylindrical combustor using CONCHAS-code was investigated. The time dependent nature of droplet motion, fluid pattern and their combined combustion phenomena for various parameter such as spray injection angle, droplet size and swirl velocity was predicted. The results indicated that the characteristics of flame propagation have been significantly affected by these parameters. This is to say, initially the diffusion flame was developed due to the evaporating of droplets. Again the diffusion flame propagated after the fuel vapors were enough burned up.

1. 서 론

액상(liquid phase)의 제트(jet) 혹은 쉬트(sheet)가 부서지면서 이루어지는 작은 액적들이 형성하는 분무연소(spray combustion)현상은 액상의 연료와 기상(gas phase)의 공기가 혼합되어 2상(two phase) 유동문제를 수반하고, 그로 인하여 액상연료와 기상공기 사이에 질량, 운동량 및 에너지의 상호 교환이 제트 형태의 유동에서 보다 더 빨리 이루어지게 함으로써 교환율을 증가시킨다. 그러나 미세한 액적들에 의하여 형성되는 분무화염의 열 및 유동장 특성의 예측에는 상이 다른 기체와 액체의 존재로 인하여 해석상 매우 난해하므로 이러한 연소현상에는 적절한 가정에 의한 모델링이 요구된다.

현재, 주로 사용되고 있는 이론 해석상의 분무모델⁽¹⁾로는 첫째, 아주 작은 액적($<10\mu\text{m}$)들이 기상과 동적 및 열적인 평형상태에 있다고 가정함으로써 기체화된 연료가 산화제인 공기와 혼합되어 있다고 보는 LHF(local homogeneous flow)모델과 전자의 경우보다 큰 액적($>20\sim30\mu\text{m}$)들이 각각의 궤적을 따라가며 그 위치에서의 기상과 연계하여 이상특성을 갖는 유동현상으로 해석하는 SF(separated flow)모델 등 크게 두가지로 나눌 수 있고, 또한 대개의 실제적인 분무연소는 난류유동을 수반하므로 확률적인 해석법^(2~4)이 많이 사용되고 있으며, 물리적으로 중요한 인자인 액적 증발율이 연소현상을 크게 지배하므로 이에 대한 적절한 모델의 제시⁽⁵⁾가 필요하다.

본 연구에서는 자동차엔진에 대한 응용의 일환으로써 밀폐된 축대칭 연소실내의 정지하고 있는 공기에 분사에 의해 형성된 분무액적들을 점화원을

*정회원, 한국과학기술원 항공공학과

이용하여 화염을 생성시키고 그에 따른 화염전파 및 낮은 마하수에서의 유동현상과 이상간의 물리적 관계를 다차원 유한차분법에 의한 물리적인 지배방정식의 동시해법인 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)방법⁽⁶⁾으로 구성되어 있는 CONCHAS-code⁽⁷⁾를 이용하여 해석하고, 연료액적의 분사각도, 크기 및 연소실내 기체유동의 가속도의 변화에 의한 분무연소의 과도적특성을 고찰하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 기체장

본 연구의 기하학적 형상은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 피스톤 상단부의 경사진 컵을 포함한 연소실로써, 이러한 형상을 해석하기 위하여 비직교, 가변성의 임의형태 격자계를 취한다. 이러한 형태의 격자계에서 격자점이 유체와 함께 움직이고(Lagrangian), 고정되거나(Eulerian), 혹은 임의로 움직이는(mixed) ALE법을 사용하여 보존방정식을 수치해석한다.

축대칭 좌표계의 지배방정식과 이에 따른 보조방정식 등은 연산자 $\nabla = (\partial/\partial r)i_r + (\partial/\partial z)i_z$ 과 속도 벡터 $u = v_r i_r + v_z i_z$ 을 사용하여 다음과 같은 식들으로써 표현한다.

$$\begin{aligned} & \text{화학종 연속방정식} \\ & \frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{1}{r} \nabla \cdot (r \rho_k u) \\ & = \frac{1}{r} \nabla \cdot \left[r \rho D \nabla \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_{ck} + \dot{\rho}_s \delta_{kt} \end{aligned} \quad (1)$$

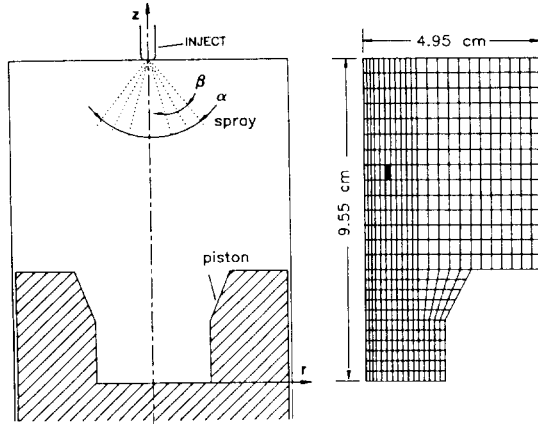


Fig. 1 Schematic diagrams of physical domain and grid system

이때 $\rho = \sum \rho_k$ 로써, 액상을 제외한 기체밀도의 합이다.

기체장 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \nabla \cdot (r \rho u) = \dot{\rho}_s \quad (2)$$

반경 및 축방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{r} \nabla \cdot (r \rho u u) = -\nabla P + \frac{1}{r} \nabla \cdot (r \underline{\sigma}) \\ & - \frac{\sigma_0 - \rho v_\theta^2}{r} \nabla r + \mathbf{F} + \rho \mathbf{G} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\underline{\sigma}$ 및 σ_0 는 각각 다음과 같이 표현되는 응력항이다.

$$\begin{aligned} \underline{\sigma} &= \mu[(\nabla u) + (\nabla u)^T] - (2\mu/3r) \nabla \cdot (ru) \underline{E} \\ \sigma_0 &= (2\mu/r) u \cdot \nabla r - (2\mu/3r) \nabla \cdot (ru) \end{aligned} \quad (4)$$

각 운동량 방정식

$$\frac{\partial (r \rho v_\theta)}{\partial t} + \frac{1}{r} \nabla \cdot (r^2 \rho v_\theta u) = \frac{1}{r} \nabla \cdot (r \tau) + N \quad (5)$$

식 (5)의 τ 는 선회전단응력으로, $\tau = \mu r^2 \nabla (v_\theta/r)$ 이다.

점성계수는 온도의 함수로써 Zhong와 Yang⁽⁸⁾의 식을 사용하였다.

내부 에너지로 표현된 에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \frac{1}{r} \nabla \cdot (r \rho I u) = \frac{P}{r} \nabla \cdot (ru) + \frac{\sigma_0}{r} u \cdot \nabla r \\ & + \frac{1}{r} \nabla \cdot \left[r \lambda \nabla T + r \rho D \sum_k h_k \nabla \left(\frac{\rho_k}{\rho} \right) \right] \\ & + \dot{Q}_c + \dot{Q}_s + \underline{\sigma} : \nabla u + \tau \cdot \nabla \left(\frac{v_\theta}{r} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식들에서 우변에 나타나는 ρ_s , F , N , Q_s 들은 액적의 증발에 의한 생성항이고 ρ_{ck} 와 Q_c 는 화학반응에 의하여 생성 및 소멸하는 항이다.

상태 방정식

$$P = R_\alpha T \sum_k \frac{\rho_k}{W_k} \quad (7)$$

기타 내부에너지등 보조방정식들은 참고문헌 (7)의 식을 사용하였다.

난류 유동장을 해석하기 위하여 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 Deardoff⁽⁹⁾가 제시한 식을 사용하여 SGS(subgrid scale)모델을 사용하였다. 이로부터 주어지는 난류 확산계수 μ_t 는 다음과 같다.

$$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{2}} (k_D \Lambda)^2 \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

이때 μ_t 를 계산하기 위하여 Λ 는 격자의 가장 긴 길이를 택하고 k_D 는 실험적으로 주어지는 상수로

써 0.1을 취하였으며, 벽 근처에서는 벽법칙⁽¹⁰⁾을 사용한다.

2.2 액체장

빠른 속도로 분사되는 연료의 분무화는 정지해있는 주위의 유체를 가속시킬 만큼 큰 운동량을 지니며 비균질 연료-공기 혼합체를 생성하고 이로 인하여 연료액적과 주위유체 사이의 유동과 온도분포등에 지대한 영향을 미친다. 그러나 연속체인 유체에 많은 수의 액적을 그 특성을 모두 고려하여 해석한다는 것은 불가능하다. 그러므로 액적분무를 적절한 형태로 모델링을 하여야 하는데, 본 연구에서는 Monte Carlo방법에 의한 표본채집법으로써 분무물 크기와 성분등이 동일한 특성을 지닌 구분된 상용 액적군에 대응시켜 이들로써 연속체인 유동장과 연계하여 전체분무의 특성을 파악하는 방법⁽¹¹⁻¹²⁾을 사용한다.

분무액적은 Langrangian 형식으로 다음과 같은 가정하에서 지배방정식을 유도한다.

모든 액적은 구형이고, 액적내 유동은 없으며, 또한 액적의 열전도도는 매우 커서 일정한 온도로 유지되나 각각의 액적들 또는 시간에 따른 액적의 온도는 변하고, 액적사이의 상호충돌은 무시한다. 이러한 가정에 의하여 다음과 같은 지배방정식을 얻는다.

액적의 위치

$$\mathbf{x}_m = r_m \mathbf{i}_r + z_m \mathbf{i}_z \tag{9}$$

액적의 속도는 위치를 시간에 대하여 미분한 $\mathbf{u}_k = d\mathbf{x}_k/dt$ 이다. 특히 난류가 입자의 확산에 큰 영향을 끼치므로 유체의 순간속도 $\mathbf{u}_g = \mathbf{u} + \mathbf{u}'$ 를 정의하며 \mathbf{u}' 는 유체의 난류 요동항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹³⁾.

$$\mathbf{u}' = [(0.4/3)(v_r^2 + v_\theta^2 + v_z^2)]^{1/2} \times \text{sign}(2y-1) \text{erf}^{-1}(2y-1) \tag{10}$$

운동량 방정식

$$\frac{d\mathbf{u}_m}{dt} = \frac{D_m}{m_m}(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_k) + \frac{v_\theta^2}{r} \nabla r + \mathbf{G}$$

$$\frac{dv_\theta}{dt} = \frac{D_m}{m_m}(v_\theta - v_{\theta m}) - \frac{|\mathbf{u}_m|u_\theta}{|\mathbf{x}_m|} \tag{11}$$

식 (11)의 D_m 는 유체에 의한 항력으로 다음과 같이 주어진다.

$$D_m = 3\pi\hat{\mu}d_m + (1/8)\pi d_m^2 C_D |\mathbf{u} - \mathbf{u}_k|$$

$$\hat{\mu} = \mu_{air}(\hat{T}) \quad \hat{T} = (T + 2T_m)/3 \tag{12}$$

액적 증발률 방정식

$$\frac{dm_m}{dt} = \left(1 - \frac{Y_o}{Y_o^*}\right) \frac{2 + 0.6(Re^* Sc^*)^{1/2}}{2 + 0.6(Re^* Pr^*)^{1/2}} \frac{q_m Le^*}{Y_f(h_f - h_f^*) + Y_o(h_o - h_o^*)} \tag{13}$$

식 (13)에서 계수 및 항들은 다음과 같다.

$$q_m = \pi d_m \lambda^* (T - T_m) [2 + 0.6(Re^*)^{1/2} \times (Pr^*)^{1/3}] / [(1 - Y_f) / (1 - Y_f^*)]$$

$$Y_f^* = W_f / [PW_o / P_v(T_m) + W_f - W_o]$$

$$m_m = (1/6) \pi \rho_m d_m^3 \quad h_o^* = h_o(T_m)$$

$$h_f^* = h_f(T_m) \tag{14}$$

여기서 P 와 P_v 는 각각 기체의 압력과 액적의 증기압을 나타낸다.

에너지 방정식

$$m_m \frac{dH_m}{dt} = L_m(T_m) \frac{dm_m}{dt} + q_m \tag{15}$$

여기서 L_m 는 액체연료의 증발잠열이고 H_k 는 주어진 온도에서 순수한 액체상태의 엔탈피로써 $L_m(T_m) = h_f^* - H_m$ 이다.

위의 주어진 식들에서 쓰인 하첨자 f 는 연료를 나타내며 o 는 연료를 제외한 혼합기체를 의미하고 m 은 각각의 액적을 의미하며, 상첨자 $*$ 는 액적 표면의 상태를 표시한다. 기타의 보조식들은 참고문헌 (7)의 식을 사용하였으며 무차원 수는 다음과 같이 정의하였다.

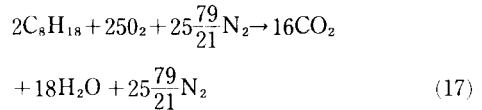
무차원 수

$$Re^* = \rho d_m |\mathbf{u} - \mathbf{u}_m| / \mu^* \quad Pr^* = C_p^* \mu^* / \lambda^*$$

$$Sc^* = \mu^* / (\rho^* D^*) \quad Le^* = Pr^* / Sc^* \tag{16}$$

2.3 연소현상 모델 및 기체-연계 생성항

연소는 일단계 반응으로 이루어진다고 가정하여 다음과 같은 반응식을 취한다.



화학 반응률은 Arrhenius 꼴로 다음 식으로 주어진다.

$$\dot{\omega} = A \exp(-T_e/T) \prod_k (\rho_k / W_k)^{\nu_k} \tag{18}$$

화학반응에 의한 화학종 생성률과 열발생량은 각각

$$\dot{\rho}_{ck} = W_k(\nu'' - \nu') \dot{\omega} \quad \dot{Q}_c = q \dot{\omega} \tag{19}$$

이고, 연료의 반응열 q 는 1.027×10^{-3} J/g-mole, pre-exponential factor A 는 10^{13} cm³/sec, 활성화 온도 T_e 는 15780K이다.

기체장과 액적간의 상호작용에 의한 연계생성항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_s &= -\frac{1}{r} \sum_m \frac{dm_m}{dt} \delta(r-r_m) \delta(z-z_m) \\ \mathbf{F} &= \frac{1}{r} \sum_m \left[D_m(\mathbf{u}_m - \mathbf{u}) - \mathbf{u}_m \frac{dm_m}{dt} \right] \\ &\quad \times \delta(r-r_m) \delta(z-z_m) \\ N &= \frac{1}{r} \sum_m \left[D_m(v_{\theta m} - v_\theta) - v_{\theta m} \frac{dm_m}{dt} \right] \\ &\quad \times \delta(r-r_m) \delta(z-z_m) \\ \dot{Q}_s &= \frac{1}{r} \sum_m \left[-\frac{d(m_m H_m)}{dt} + \left(D_m - \frac{1}{2} \frac{dm_m}{dt} \right) \right. \\ &\quad \left. \times |\mathbf{u} - \mathbf{u}_m|^2 \right] \delta(r-r_m) \delta(z-z_m) \quad (20) \end{aligned}$$

3. 수치해석

앞에 언급한 지배방정식을 차분화하여 다음과 같은 절차에 따라 수치 해석한다.

- (1) 유동장내의 액적의 위치와 생성량 및 난류항을 계산한다.
- (2) 내부유동장을 계산한다.
- (3) 격자 꼭지점을 계산된 유동속도에 따라 새로운 위치로 이동한다.
- (4) 유체에 대한 격자점의 상대적인 운동에 의한 각 전달량들을 구하고 이양을 이용하여 다음 싸이클에 필요한 화학종의 질량, 운동량 및 내부에너지를 구한다.

한가지 경우의 계산에 필요한 시간은 CONVAX의 CPU 시간으로 약 3시간정도 소요된다.

4. 결과 및 토론

본 연구에서는 분무연소실내의 유동특성 및 연소특성을 예측하기 위하여 액적 분사각, 크기 및 연소실내 각속도를 변화 시켜가며 계산을 수행하였고, 그 결과를 Table 1에 나타낸 바와 같은 3가지 CASE에 대하여 비교 고찰하였다.

Table 1 Cases of calculation for various parameters

Cases	φ	$\alpha(0)$	$\beta(0)$	Ang(1/s)	S.M.D(μm)
CASE 1	0.241	75	15	150	30
CASE 2	0.241	120	60	150	30
CASE 3	0.241	120	60	300	45

φ : overall equivalence ratio, α : average injection angle, β : spread angle, Ang: uniform angular velocity, S.M.D.: Sauter mean diameter of the droplets

연소실의 기하학적 형상과 수치, 그리고 계산에 사용한 격자계를 Fig. 1에 도시하였다. 분무시키는 액적은 n-octane(C_8H_{18})으로 계산시작부터 1.27ms 동안 분사속도 4500cm/s로 총 11.6mg을 분사시키며 이때 당량비는 0.241이 된다. 이와 같은 분무연소시에는 적은량의 연료가 분무되더라도 국부적으로는 연료과잉(fule rich)영역이 존재할 수 있다. 점화는 2.23ms에서 자발적으로 발생하도록 하기 위하여 Fig. 1의 격자계에 흑색으로 표시된 격자내($r=1.6\text{cm}$, $z=5.979\text{cm}$)에 가상의 점화원을 설정하고 2.23ms에서 3.19ms동안 점화격자내의 내부 에너지를 $I=I^*(1+10^4 \Delta t)$ 식에 따라 급속히 증가시켜 점화격자의 온도가 1600K가 되도록 한다. 점화격자의 크기와 점화 에너지 공급시간은 되도록 작게 하였으나, 본 연구의 주목적이 점화에 있지 않고 점화이후 화염 및 전파 특성에 있으므로 이에 대한 토론은 생략하였다. 초기 공기의 온도는 550K로 하였으며, 이때 공기의 밀도는 $1.413 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 이고 Pr 및 Sc 수는 0.7을 취하였으며, 벽면은 등온의 free slip wall로 가정하였다.

Fig. 2는 CASE 1, 2, 3, 각각 경우의 시간에 따른 액적분포를 도시한 것으로, 분사각의 변화에 따른 동일한 크기 액적의 분포특성을 파악하기 위하여 CASE 1과 2를 비교하여 보면, 분사각이 작고 속

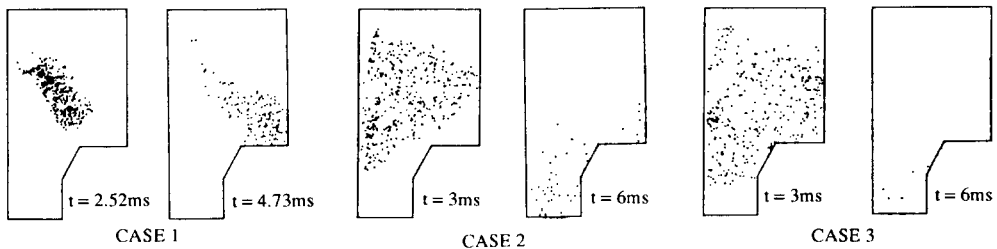


Fig. 2 Distributions of liquid spray particles for CASE 1, 2 and 3 at two time steps

이 빈 원뿔형으로 분무되는 CASE 1인 경우에는 분무액적들이 밀집된 형태를 유지하며 시간이 지남에 따라 벽쪽으로 침투해가는 반면 분사각이 크고 속이 찬 원뿔형으로 분무되는 CASE 2인 경우에는 초기에 넓게 분포된 액적들이 그 상태로 벽쪽으로 침투함을 알 수 있다. 그러므로 효율적 연소의 관점에서 본다면 국부적으로 연료과잉 상태를 유발시키는 CASE 1보다는 분사각을 넓게 하여 균일한 연료분포를 이루도록 하는 것이 좋다. 그러나 분사각을 너무 넓게하면 액적이 증발할 수 있는 충분한 이동거리를 확보하지 못하는 경우가 생기므로 적절한 분사각의 선택이 필요하다.

액적의 크기에 따른 분무 분포 특성은 CASE 2와 3을 비교함으로써 파악할 수 있다. 동일한 분사각에서 같은 시간에 액적의 크기가 큰 CASE 3인 경우, 액적이 실린더 컵쪽으로 더 많이 분포되어 있고 시간이 더욱 경과함에 따라 대부분의 액적이 연소실내벽에 도달한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 초기 액적의 운동량이 기체장에 의한 저항에 의하여 기체유동을 유발시키고 이로 인하여 자신의 운동량을 손실하는데, 큰 액적은 상대적으로 질량이 커서 초기에 분사될 때 수반하는 운동량이 크고 또한 표면적이 크므로 저항력도 크다. 이때 운동량의 증가는 액적반경의 3제곱에 비례하나 저항력의 증가는 2제곱에 비례하므로 결과적으로 초기 운동량에 의하여 큰 액적일 수록 같은 시간에 더 멀리 까지 움직일 수 있다. 그러므로 액적이 크면 투과율이 커서 증발할 시간이 충분치 못하여 연소효율이 떨어질 수 있다.

Fig. 3과 4는 점화원이 위치한 곳에서 분사각의 변화에 따라 축방향 및 반경방향으로의 화염의 전파과정과 전파특성을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 축방향으로의 화염의 전파는 CASE 2인 경우가 CASE 1보다 두배 정도 빨리 전파된다. 이것은 CASE 2인 경우 분무된 연료액적이 연소실내에서 더욱 빨리 분포되고 증발되어 화염이 전파될 수 있는 연료-공기 혼합물을 형성하기 때문이다. 점화가 일어나기 전($t < 3ms$)에는 액적이 증발하며 잠열을 빼앗으므로 점화원 주위의 기체온도가 초기온도 550K 보다 낮아지나 증발된 연료가 확산화염의 형태로 점화되고 나면 급격한 온도의 증가로 연소실내에 분포되어 있던 연료액적이 빠른 속도로 증발하여 주위 기체의 온도는 급속히 회복되고 예혼합화염을 유지시킬 수 있는 연료-공기 혼

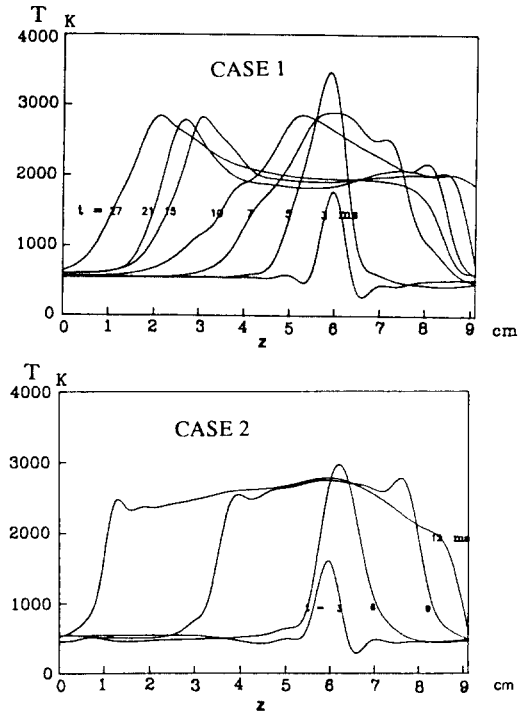


Fig. 3 Flame propagation for CASE 1 and 2 along the axial direction with time at $r=0.6cm$

합물이 형성되며 화염은 예혼합화염의 형태로 전파된다. 이와 같은 작용으로 점화 직후인 $t=3ms$ 일 때 연료액적의 갯수가 44개에서 $t=5ms$ 이면 그 반인 200개 수준으로 빠른 감소를 보인다. 그러나 벽까지 투과된 액적들은 화염으로 부터의 거리가 멀어서 증발이 다 되지않고 남은채로 서서히 증발하면서 예혼합화염 말기에 형성되는 확산화염의 주된 연료 공급원이 된다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 반경방향으로의 화염의 전파는 축방향과는 반대로 CASE 1인 경우의 속도가 약간 더 빠르다. 이는 점화원 위치에서 반경방향의 액적분포 및 증발율이 국부적으로 CASE 1이 더 빠르기 때문이다. 또한 Fig. 3에서와는 달리 주위 기체의 온도 강하가 $t=3ms$ 일 때는 없다가 $t=5ms$ 일 때 나타나는 것은 $t=5ms$ 일 때 화염이 지나는 위치에 연료액적이 많이 분포되어 있었기 때문이다. 화염의 전파가 약 $r=2.2cm$ 부근에서 정체하는 것은 $r=2.2cm$ 보다 큰 부분에는 예혼합화염을 이를 충분히 기화된 연료-공기 혼합물이 형성되지 못하고 산소과잉 현상이 나타나서 벽면까지

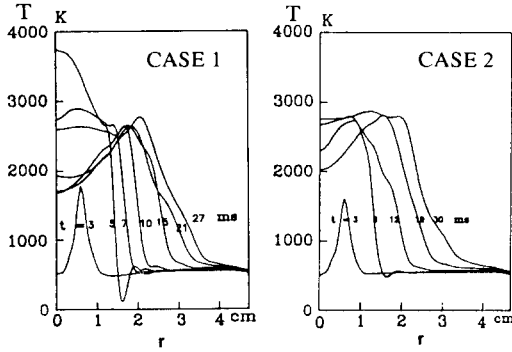


Fig. 4 Flame propagation for CASE 1 and 2 along the radial direction with time at $z=5.979\text{cm}$

침투한 연료가 서서히 증발하여 확산화염을 형성시키기 때문이다.

Fig. 5와 6은 각각 CASE 2, 3인 경우, 속도벡터와 온도 및 당량비의 등가선의 변화를 시간에 따라 그린 것이다. 초기에 액적이 분무되면서 기체에 운동량을 천이하여 주위유동을 생성시키고, 점화원에 의하여 화염이 형성된다. 이 후 화염지역의 밀도는 급격한 온도상승으로 증가하게 되고 이 부분에 와류가 형성되면서 속도분포에 영향을 준다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 시간이 경과하면서 화염이 전파되기 시작하여 $t=6\text{ms}$ 가 되면 화염대 바깥부분의 기체는 계속 밀리고, 또한 축방향으로의 화염의 전파가 빠르므로 속도벡터는 축방향에서 가장 크게

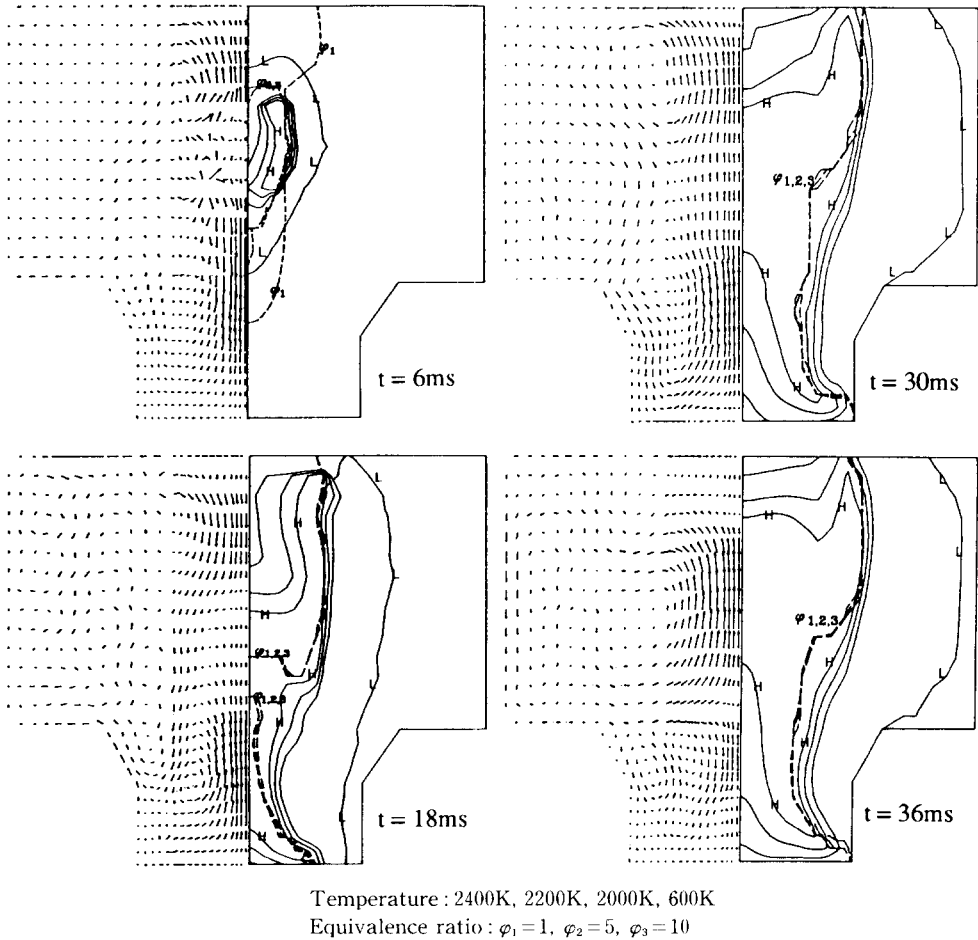
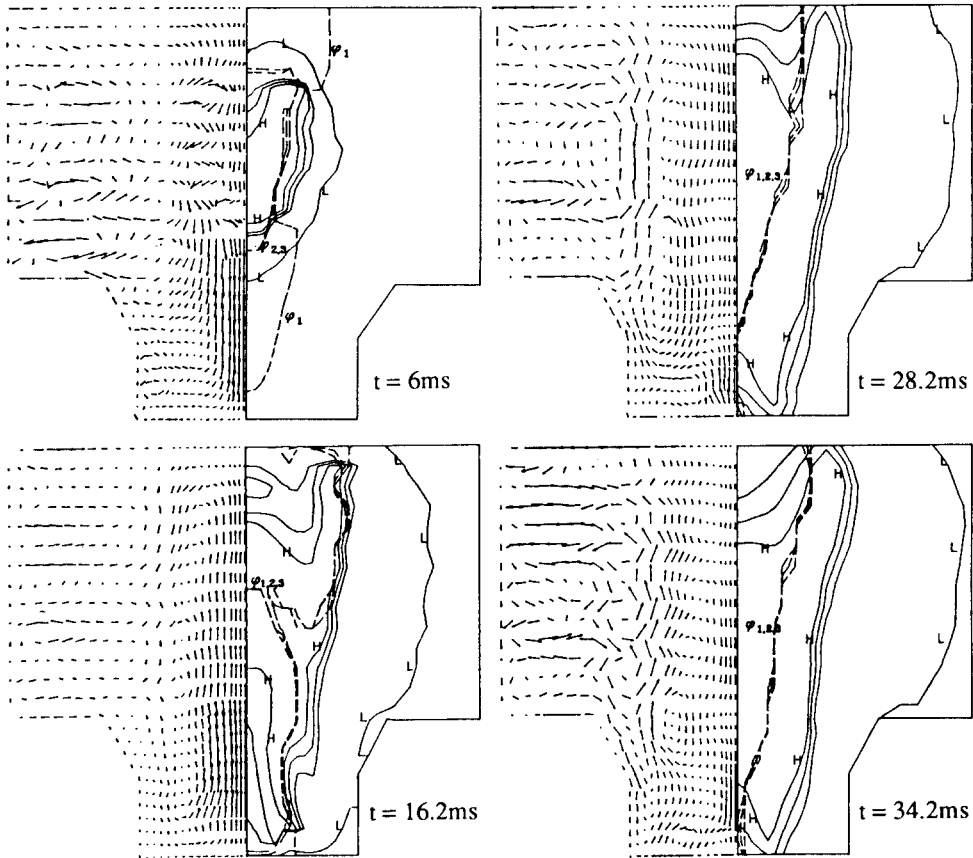


Fig. 5 Velocity vector, temperature and equivalence contour at four time steps for CASE 2



Temperature : 2400K, 2200K, 200K, 600K
 Equivalence ratio : $\phi_1=1, \phi_2=5, \phi_3=10$

Fig. 6 Velocity vector, temperature and equivalence contour at four time steps for CASE 3

화염을 중심으로 연소실의 상하부로 분포된다. 연소실 컵을 포함한 하단부에서는 기체가 벽면에서 밀려 순환하며 빠져나간다. 시간이 더욱 지나서 $t=18\text{ms}$ 이 되면 연소가 하단부까지 화염이 전파되어 컵내의 기체는 축근처를 통하여 빠져나가며 밀려나간 기체에 의하여 연소실 전체 내부유동이 영향을 받아서 작은 재순환 영역이 벽근처에 몇개 형성된다. $t=30\text{ms}$ 이 되어 예혼합화염의 진행이 거의 끝나고 정체가 시작하면 재순환 영역은 기하학적 형상에 의하면 컵부분에 하나 형성되며 연소실 상단에 또 하나의 재순환영역이 형성되다가 이 재순환 영역이 아래로 밀려 내려옴을 볼 수 있다. 앞에서 예측했던 대로 등온선의 고온부분의 시간에 따른 분포의 변화와 당량비 등가선의 밀집분포로

부터 어느정도 시간이 경과하면 화염이 예혼합 화염으로 부터 정체된 확산화염으로 천이함을 알 수 있다.

Fig. 6은 액적의 크기와 기체각속도를 동시에 증가시킨 CASE 3인 경우로서 Fig. 5에서와 달리 초기에 연소실 벽근처에 속도가 매우 큰 부분이 존재함을 볼 수 있는데, 이것은 연소실내 기체의 각속도가 크기 때문에 각속도가 크면 액적과 기체장간의 운동량 교환이 커져서 이러한 속도분포가 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 CASE 3일 때 화염의 전파속도가 CASE 2보다 빠르므로 $t=16.2\text{ms}$ 일 때 벌써 CASE 2의 $t=30\text{ms}$ 일 때와 비슷한 속도장을 갖게되고 Fig. 5에서와는 달리 복잡한 운동장이 형성되어 감을 보여준다. 위에서 언급한 바와

같이 화염의 전파속도는 CASE 2보다 빠르나 반경 방향으로는 많이 진전되지 못하고 확산화염으로 친이되고 있다.

연소실내의 이와 같은 현상으로 부터 분사각 및 분무되는 액적의 크기와 내부기체의 각속도는 연소실의 효율에 크게 영향을 미침을 예측할 수 있다.

5. 결 론

엔진 연소실내의 분사각, 액적 크기 및 기체각속도 등 매개변수를 조절하여 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분무액적에 의한 연소는 전체적으로, 초기에는 액적이 증발하여 확산화염을 이루고 이후 연료가 충분히 증발하여 예혼합화염으로 연소실 벽면으로 전파되다 일정한 위치에서 다시 확산화염으로 천이한다.

(2) 액적의 분사각은 축을 포함한 속이찬 원뿔형으로 넓게 조절하는 것이 연소실내의 균일한 연료분포 관점에서 효율적이다. 이경우 화염의 전파속도는 축방향으로는 매우 빨리 전파되는 예혼합화염을 얻을 수 있다.

(3) 액적의 크기는 충분한 증발이 가능하도록 작게 하는 것이 좋으며, 액적이 커지면 화염은 축방향으로 실린더 상단부와 하단부까지 고르게 전파되나 반경방향으로는 연소실의 벽면까지 전파되지 못하고 축 근처에서 확산화염으로 천이하여 효율적이지 못하다.

(4) 기체의 초기각속도는 연료와 공기가 잘 섞이도록 크게 하는 것이 좋고 이로 인하여 축방향으로의 화염전파속도는 빨라진다.

참 고 문 헌

- (1) Faeth, G. M., 1983, "Evaporation and Combustion of sprays", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 9, pp. 1~76.
- (2) Westbrook, C. K., 1977, "Three Dimensional Numerical Modeling of Liquid Fuel Sprays", 16th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, p. 157.
- (3) Gupta, H. C. and Bracco, F. V., 1978, "Numerical Computations of Two-Dimensional Unsteady Sprays for Application to Engines", AIAA J., Vol. 16, Oct., p. 1053.
- (4) Sirignano, W. A., 1974, "The Formulation of Spray Combustion Models: Resolution Compared to Droplet spacing", Int. J. Heat Transfer, Vol. 108, Aug. p. 663.
- (5) Bracco, F.V., "Application of Steady-State Spray Equations to Combustion Modeling", AIAAJ., Vol. 12, Nov., p. 1534.
- (6) Hirt, C.W., 1974, "An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds", J. Comp. Phys., Vol. 14, p. 257.
- (7) Choutman, L.D., Dukowicz, J.K., Ramshaw, J.D. and Amsden, A.A., 1982, "CONCHAS-Spray: A Computer Code for Reactive Flows with Fuel Sprays", Los Alamos National Laboratory, LA-9294-MS.
- (8) Zhong, Z., Yang, K.T. and Lloyd, J.R., 1985, "Numerical Methods in Heat Transfer", Vol. III, 9, John Wiley & Sons, p. 195.
- (9) Deardorff, J. W., 1977, "On the Magnitude of the Subgrid Scale Eddy Coefficient", J. Comp. Phys., Vol. 7, p. 120.
- (10) Schlichting, H., 1968, "Boundary Layer Theory", 7th ed. Mcgrow-Hill, New York.
- (11) Hrieger, R.B., 1980, "Combustion Modeling in Reciprocating Engines", Plenum Press, New York.
- (12) Butler, T.D., Cloutman, L.D., Dukowicz, J.K. and Ramshaw, J.D., 1981, "Multidimensional Numerical Simulation of Reactive Flow in Internal Combustion Engines", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 7, pp. 293~315.
- (13) Dukowicz, J.K., 1980, "A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays", J. Comp. Phys., Vol. 35, p. 229~253.

(1) Faeth, G. M., 1983, "Evaporation and Combustion of sprays", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 9, pp. 1