

고압에서의 분무의 증발 및 연소 현상에 관한 연구

왕 태 중* · 백 승 욱†

(2003년 2월 19일 접수, 2003년 7월 8일 심사완료)

Study on Vaporization and Combustion of Spray in High Pressure Environment

Tae Joong Wang and Seung Wook Baek

Key Words : High Pressure Evaporation Model (고압증발모델), Spray Combustion (분무연소), Auto-Ignition (자발점화)

Abstract

The present study is mainly motivated to investigate the vaporization, auto-ignition, and combustion of liquid fuel spray injected into high pressure environment. The unsteady, multi-dimensional models were used for realistic simulation of spray as well as prediction of accurate ignition delay time. The Separated Flow (SF) model which considers the finite rate of transport between liquid and gas phases was employed to represent the interactions between spray and gas field. Among the SF models, the Discrete Droplet Model (DDM) which simulates the spray using finite number of representative samples of discrete droplets was adopted. The Eulerian-Lagrangian formulation was used to analyze the two-phase interactions. In order to predict an evaporation rate of droplet in high pressure environment, the high pressure vaporization model was applied using thermodynamic equilibrium and phase equilibrium at droplet surface. The high pressure effect as well as high temperature effect was considered in the calculation of liquid and gas properties. In case of vaporization, an interaction between droplets was studied through the simulation of spray. The interaction is shown up differently whether the ambient gas field is at normal pressure or high pressure. Also, the characteristics of spray behavior in high pressure environment were investigated through the comparison with normal ambient pressure case. In both cases, the spray behaviors are simulated through the distributions of temperature and reaction rate in gas field.

Z : 압축성계수

기호설명

d	: 액적 직경
D	: 확산계수
f	: 플게시티
k	: 열전도도
L	: 증발열
n	: 수밀도
Γ	: 몰 분율
γ	: 질량 분율

1. 서론

대부분의 실용적 분무 연소 시스템이 고압의 환경 하에서 작동하고 있음에도 불구하고 종래의 분무 연소에 대한 연구의 대부분은 상압(normal pressure) 또는 저압의 환경 하에서 수행되어 왔다. 이는, 낮은 압력 환경 하에서는 해석을 단순화할 수 있는 적절한 가정들이 가능하여 상대적으로 다른 실제적 측면에 관심과 노력을 집중시킬 수 있기 때문이다.

상압에서의 분무 거동에 대한 연구를 그 초점에 따라 살펴보면, 실제 분무 거동에 대한 사실적 모사를 위하여 분무를 수많은 액적들의 집합으로 보아 액상(liquid phase)과 기상(gas phase) 사이의

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : swbaek@sorak.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3714 FAX : (042)869-3710

* 한국과학기술원 기계공학과

교환 현상에 초점을 둔 연구, 집단 연소 모델(group combustion model)을 도입하여 액적들 간의 부딪힘, 깨어짐 등 복잡한 상호 작용에 대해 사실적 모사를 수행한 연구, 다양한 화학종 및 단단계 반응을 고려하여 실제 연소 화학 반응에 가깝게 모사한 연구 등으로 분류해 볼 수 있다.⁽¹⁻³⁾

단일 액적의 증발 및 연소에 대한 연구는 분무의 거동을 예측함에 있어서 그 기본이 되는데, 고압에서의 단일 액적에 대한 수치적 연구는 전통적으로 실험과 병행하여 많은 연구가 수행되어 왔으며 이를 통해 액적의 거동에 미치는 고압의 효과에 대한 충분한 이해를 가능하게 하였다.⁽⁴⁻⁶⁾

고압 환경에서의 분무 거동에 관한 연구는 전술한 두 분야의 결합된 형태로 생각해 볼 수 있다. 발표된 연구를 살펴보면, 이상(two phase) 간 전달 현상의 복잡성을 배제하기 위해 분무 유동을 관심 있는 국소 지역에서 단상(single phase)으로 단순화시킨 LHF(Locally Homogeneous Flow) 모델 등을 이용한 연구, 실 기체 효과(real gas effect) 등을 고려하지 않으므로 고압 환경 하에서의 분무의 증발을 사실적으로 예측하는데 다소 무리가 있는 상압 증발 모델을 적용한 연구 등 주로 이들 연구에서는 고압에서의 분무 거동 특성에 내재된 복잡성과 난해함으로 인해 자신들의 목적에 맞도록 단순화한 모델을 사용하고 있다.⁽⁷⁻¹⁰⁾ 이처럼 현재까지의 고압에서의 분무 거동에 대한 수치적 연구는 여러 단순화 모델을 사용할 뿐더러 수많은 가정을 포함하므로 실제 현상의 사실적 예측이라는 측면에 있어서 아직은 초기 단계라 할 수 있다.

본 연구에서는 분무의 사실적 모사와 점화 지연 시간의 정확한 예측을 위해 비정상(transient), 다차원(multi-dimensional) 모델을 사용하였다. 분무와 기체장과의 상호 작용에 있어서는 이상 간에 교환되는 질량, 운동량, 에너지의 전달 현상을 유한한 속도로 모사하는 SF(Separated Flow) 모델을 도입하

였는데, 그 중에서도 분무가 수많은 대표 액적들에 의해 나타내지며 각 대표 액적들은 라그랑지안(Lagrangian) 접근 방법에 의해 풀이되는 DDM(Discrete Droplet Model) (또는 PSIC 모델)을 사용하였다. 또한, 고압 환경에서 적용 가능한 증발 모델을 도입하였으며, Redlich-Kwong 상태 방정식을 이용하여 실 기체 효과를 고려하였다. 기상 및 액상의 물성치를 계산함에 있어서는 온도, 압력 및 조성에 따른 변화를 고려하였다.

본 연구의 개략도를 Fig. 1에 나타내었는데, 액체 분무는 2 차원, 축 대칭, 정적(closed-volume) 연소기 내 정지된 고온, 고압의 공기 중으로 분사되는 것으로 모사 된다. 분사된 분무 액적들은 시간이 경과함에 따라 증발, 혼합, 점화, 연소 등의 현상을 겪게 되는데, 이에 대한 해석을 통해 분무 거동 시에 나타나는 액적들 간 상호 작용을 이해하고, 특히 상압과의 비교를 통해 고압 환경이 분무의 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 모델링

2.1 분무 모델

연소기 내로 분사된 분무는 불연속적인 액적군의 형태로 연속적인 기체장 속을 지나가는 유동 형태를 갖는다. 본 연구에서는 앞서 언급한 SF 모델 가운데 DDM을 사용했는데, 이 때 액적과 기체장 사이의 상호 작용은 지배 방정식의 생성항에 의하여 고려되었다.⁽¹²⁾

2.2 고압 증발 모델

고온, 고압의 연소실 내로 분사된 분무 액적은 기체장으로의 증발을 시작하는데, 이는 액적 표면에서와 주변 기체장과의 농도 구배에 의해 일어난다. 따라서 액적 증발의 사실적 예측을 위해서는 액적 표면에서의 연료 농도를 정확하게 얻어 내야 하는데, 상압 환경에서는 이상기체 가정을 통해 간단하게 이를 얻을 수 있지만 고압 환경에서는 실 기체 효과를 고려해야 한다. 본 연구에서는 열역학적 평형 조건과 상 평형 조건을 이용하여 액적 표면에서의 연료 농도를 얻고, 이로부터 액적의 증발율을 구하였다. 이 때, 온도, 압력 및 조성에 따른 액적 증발율의 변화를 고려하였다.

액적 표면에서 열역학적 평형 상태가 만족되기 위해서는 온도, 압력 및 각 화학종들의 퓨게시티(fugacity) 사이에 다음의 조건들이 성립해야 한다.

$$T^v = T^l ; p^v = p^l ; f_i^v = f_i^l \quad (1)$$

여기서, 상첨자 v 와 l 은 각각 기상과 액상을 의미한다. 또한, 본 연구에서 이루어지는 고압 분무 연소의 짧은 시간과 압력 범위 내에서는 주변 공

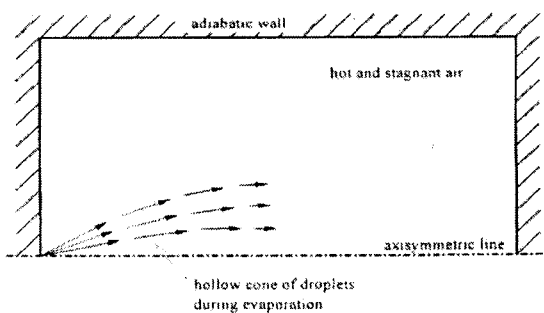


Fig. 1 Schematic of the liquid fuel spray and axisymmetric combustor

기의 n-heptane 연료 액적으로서의 용해(solubility)가 무시할 수 있을 정도로 미미하므로, 이를 무시한다면 기상과 액상 간의 상 평형 관계식은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$X_{fs}(p, T) = \frac{p_{vp,f}(T) \phi_f^{sat}(T)}{p \phi_f} \exp\left(\int_{p_{vp,f}}^p \frac{v_f'(T, p)}{R_u T} dp\right) \quad (2)$$

여기서, 하첨자 f 는 연료 증기를 의미하며, X_{fs} 는 액적 표면에서의 몰 분율, $p_{vp,f}$ 는 포화 증기 압력, v_f' 은 액체 상태의 몰 체적이다. 또한, ϕ_f^{sat} 는 포화 상태에서의 퓨계시티 상수를 의미하며 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$R_u T \ln \phi_f = \int \left[\left(\frac{\partial p}{\partial N_i} \right)_{T, v, N_j} - \frac{R_u T}{v} \right] dv - R_u T \ln Z \quad (3)$$

그리고, 액적의 상 변화 시에 필요한 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta h = \sum_i X_i' \bar{H}_i(T, p, X_i') - \sum_i X_i^g H_i^g(T, p) \quad (4)$$

여기서, X_i' 과 X_i^g 는 각각 액체 상태와 기체 상태에서의 몰 분율을, H_i^g 은 액체 상태에서 각 성분의 엔탈피를 나타내며, \bar{H}_i 는 아래의 관계식에 의하여 결정한다.

$$\left(\bar{H}_i - H_i^g \right)_T = -R_u T^2 \left(\frac{\partial \ln \phi_i}{\partial T} \right)_{p, X^g} \quad (5)$$

여기서, H_i^g 는 동일한 온도에서의 이상 기체 상태의 엔탈피를 의미한다.

2.3 화학 반응 모델

본 연구에서 연소 현상은 2차, 단단계 반응으로 가정하였으며 아레니우스(Arrhenius) 형태의 반응률을 사용하였다.

3. 지배 방정식

3.1 기체장에 대한 지배 방정식

기체장 내 모든 종속 변수들에 대한 일반적인 형태의 지배 방정식을 원통형 좌표계에서 표현하면 다음과 같은 기본 형태로 나타나며, 각 방정식에서의 변수 및 생성항은 Table 1에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \rho v \phi - y \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = S_{\phi, s} + S_{\phi, i} \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 액적에 대한 지배 방정식

3.2.1 액적의 질량 보존 방정식

액적 질량 보존은 다음의 Ranz-Marshall 실험식을 사용하였다.⁽¹⁵⁾

$$\frac{dm_d}{dt} = \dot{m}_s \left(1 + 0.3 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \right) \quad (7)$$

액적이 항상 구형이며, 준정상(quasi-steady) 상태로 가정하면 위 식에 나타나는 정지 상태에서의 액적

Table 1 Variables and source terms appearing in gas field governing equation

Equation	ϕ	Γ_ϕ	$S_{\phi, s}$	$dV_\phi S_{\phi, i}$
Continuity	1	0	0	$\sum n \dot{m}_i$
Axial momentum	u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$	$\sum \left(n \dot{m}_i u - \frac{4}{3} \pi \rho_d r_d^3 n F_\phi \right)$
Radial momentum	v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2\mu v}{y^2} + \frac{\rho v^2}{y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left(y \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right)$	$\sum \left(n \dot{m}_i v - \frac{4}{3} \pi \rho_d r_d^3 n F_\phi \right)$
Energy	h	Γ	$\frac{\partial p}{\partial x} + \mu G + W_i Q R_i$	$\sum \left\{ -n \dot{m}_i \left(C_p (T_s - T_d) + L \right) \right\}$
Mass fraction (fuel)	Y_i	Γ	$-W_i R_i$	$\sum n \dot{m}_i$
Mass fraction (other species)	Y_i	Γ	$\mp \nu_i W_i R_i$ (- for O ₂ , + for product)	0

where, $\Gamma = \frac{\mu}{\sigma_\phi}$, $G = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{v}{y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2$, $F_\phi = \frac{\partial \phi_i}{\partial x}$

Table 2 Methods for evaluating thermo-physical properties

Phase	Property	Baseline method	High pressure correction	Mixing rule
Gas	Density	Redlich-Kwong E.O.S.	Redlich-Kwong E.O.S.	-
	Diffusivity	Fuller et al., 1969	Takahashi, 1974	Wilke relation ⁽¹⁸⁾
	Heat capacity	Hyperbolic function of temperature	-	Mole fraction weighting
	Thermal conductivity	Third-order polynomial function of temperature	Stiel and Thodos, 1964	Wassiljewa relation ⁽¹⁸⁾
	Viscosity	Chung et al., 1986	Reichenberg, 1975	-
Liquid	Density	Exponential function of temperature	-	-
	Heat capacity	Rowlinson, 1969	-	Mole fraction weighting
	Heat of vaporization	-	Fugacity relation	-

Baseline method means that the properties are calculated at 1 [atm].

증발율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$\dot{m}_s = 2\pi dpD \ln(1+B) \quad (8)$$

여기서, B 는 Spalding의 전달 수(transfer number)로써 다음과 같다.

$$B = \frac{Y_{fs} - Y_f}{1 - Y_{fs}} \quad (9)$$

여기서, Y_{fs} 는 열역학적 평형 및 상 평형으로부터 얻어지는 액적 표면에서 연료의 질량 분율을, Y_f 는 주변 기체의 연료 질량 분율을 의미한다.

3.2.2 액적의 운동량 보존 방정식

중력, Basset 힘, 액적 상호 간의 충돌 등을 무시한 액적의 운동량 보존에 관한 식은 다음과 같다.

$$m_d \left(\frac{d\vec{V}_d}{dt} \right) = \frac{1}{2} \rho C_D (\vec{V} - \vec{V}_d) |\vec{V} - \vec{V}_d| A_d - \left(\frac{m_g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (10)$$

여기서, m_d 는 액적 질량, m_g 는 액적 부피에 해당하는 주변 기체의 질량이며, 액적의 항력 계수는 Punam이 제안한 다음 식을 사용하였다.⁽³⁾

$$C_D = 24(1 + Re^{2/3}/6)/Re, \quad Re < 1000 \quad (11)$$

3.2.3 액적의 에너지 보존 방정식

액적의 에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$m_d \frac{dT_d}{dt} = \frac{Nu\pi kd}{c_{pd}} (T - T_d) - \frac{L}{c_{pd}} \dot{m}_d \quad (12)$$

여기서, 무한 전도 모델(infinite conduction model)을 적용한 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$Nu = 2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (13)$$

3.3 물성치

기상 및 액상의 물성치는 기체장의 온도 및 압력에 따라 민감하게 변화하므로 이를 고려해야 한다. 본 연구에서 물성치의 계산에 사용된 방법은 Table 2에 나타내었다.

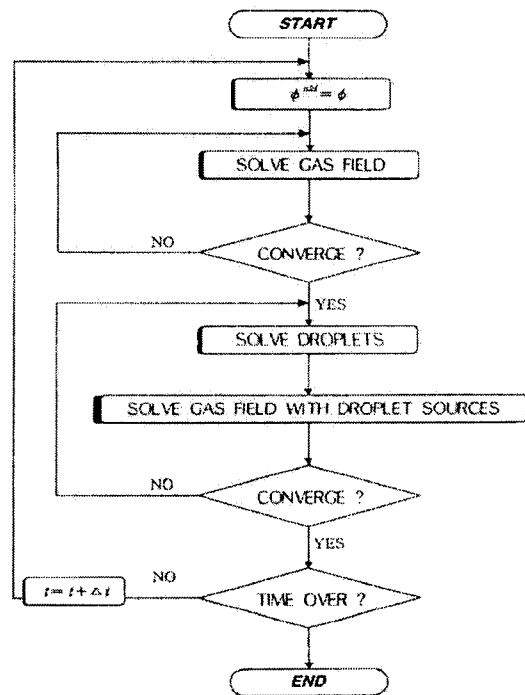


Fig. 2 Computational flow chart

4. 수치해법

기체장에 대한 지배 방정식의 유한 차분화를 위해서 TEACH 코드⁽¹⁴⁾를 수정하여 적용하였으며, 이의 풀이를 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 이용하였다. 최종 방정식은 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 이용하여 해를 구하였다. 전체 계산

Table 3 Operating condition

Fuel	n-heptane
Oxidizer	Air
Initial gas temperature	1000 [K]
Initial droplets temperature	300 [K]
Initial droplets diameter	100 [μ m]
Spray injection velocity	15 [m/s]
Fuel inflow rate	0.001 [kg/s]
Injection time duration	1 [ms]

알고리즘으로는, 최초 액적과의 관련을 배제한 상태로 기체장을 충분히 수렴할 때까지 계산한다. 다음으로, 얻어진 기체장의 속도, 압력, 온도 등을 고려하여 각 액적들을 계산한다. 이 때, 액적들이 경험하는 항력, 온도 증가 및 증발에 의한 생성항을 고려하고, 이 생성항들은 기체장의 지배 방정식에 추가되어 두 상을 연결하게 된다. 마지막으로, 액적에 의한 생성항이 고려된 기체장을 풀게 되고, 변수들이 충분히 수렴되었으면 다음 시간 단계로 이동하여 앞의 과정을 반복한다. 본 연구에서 해를 얻는 과정을 Fig. 2에 도시하였다.

5. 결과 및 토의

본 연구에서 분무는 연소기 중심축으로부터 세 가지 다른 위치 (0.10, 0.25, 0.40 [mm])에서 각각 네 방향 (10, 12, 14, 16 [°])으로 모두 12개의 경로를 따르는 속이 빈 원뿔형의 액적들에 의해 묘사 되며 이는 앞의 Fig. 1에서 볼 수 있다. 또한, 초기 작동 조건에 대해서는 Table 3에 나타내었다.

5.1 수치해의 검증

본 연구에서 사용된 코드의 검증을 위하여 Sato 등의 실험 및 계산 결과와 비교를 수행하였다.⁽¹⁶⁾ Sato 등은 정적 연소기 내의 고온, 고압의 공기 중으로 분사되는 n-decane 분무에 대해 실험적으로 점화 지연 시간을 측정하였으며, 또한 적절한 모델링을 통해 수치적으로도 이를 예측하였다. 비교 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 이 때, 계산 조건으로 n-decane을 연료로, 공기를 산화제로 사용하였으며, 초기 액적 온도 = 300 [K], 초기 액적 직경 = 30 [μ m], 분사 속도 = 100 [m/s]로 두었다. 결과를 보면, 본 연구에 의한 수치 결과가 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, Sato 등의 모델링을 통하여 얻어진 수치 결과보다 본 코드에 의한 수치 결과가 실험 결과와 더 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

5.2 분무 침투 깊이

분무 침투 깊이(spray penetration depth)란 정지된 기체장 내로 분사된 액체 분무의 선단이 도달하는 최대 거리를 의미한다. 이는 액적의 운동 에너지

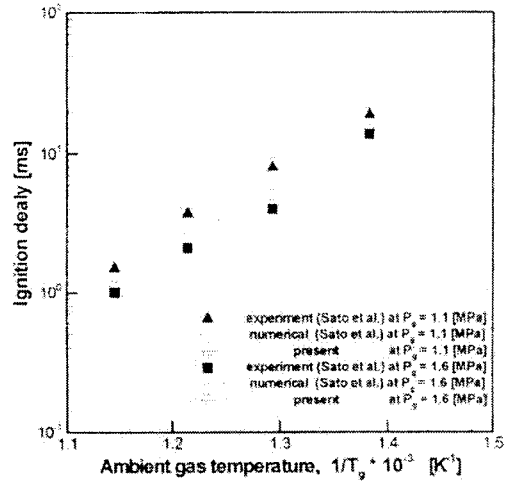


Fig. 3 Comparison of the calculated ignition delay of n-decane fuel spray with the experimental and numerical values

와 주변 기체장에 의한 공기역학적 저항의 상대적 크기에 의해서 결정되는데, 침투 깊이가 너무 짧거나 길면 불완전한 연소의 원인이 되므로 내연 기관과 같은 연소 시스템의 설계 시 중요하게 고려되어야 한다. Fig. 4와 5는 상압과 고압 환경에서의 분무 침투 깊이에 대한 결과를 나타내고 있다. 두 경우의 비교로부터 동일한 조건으로 분사된 분무에 대하여 기체장이 고압일 때 분무 침투 깊이가 짧음을 볼 수 있는데, 이에 대해서는 다음의 요인을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 기체장의 압력이 고압일 경우 액적들의 증발이 더 빠르게 완료되므로 분무 액적들이 그만큼 멀리 다다르지 못한다. 즉, 고압에서는 액적들의 생존 시간이 짧다. 둘째, 기체장 내로 분사된 액적들에 작용하는 항력에는 여러 요인들이 관계하지만, 특히 액적의 직경의 변화가 미미한 분사 초기에는 기체장의 밀도가 이에 가장 큰 영향을 미친다. 액적이 경험하는 항력은 기체장의 밀도에 비례하여 증가 하는데, 동일한 온도에서 기체장이 고압일수록 그 밀도 또한 크므로 분사 초기에 액적에 작용하는 큰 항력이 침투 거리를 짧게 하는 요인이 된다.

5.3 연소

본 절에서는 상압과의 비교를 통한 고압에서의 분무의 연소 특성에 대해 살펴보았는데, 이는 기체장 내의 온도 및 반응을 분포 등에 대한 수치적 묘사를 통하여 수행되었다. 이 때, 계산 조건은 앞의 분무 침투 깊이에 대한 경우와 동일하다.

5.3.1 기체장 내의 온도 분포

Fig. 6과 7은 기체장 내의 온도 분포 변화를 나타내고 있는데, 이로부터 전형적인 분무 연소의 모습을 관찰할 수 있다. Fig. 6의 처음 두 결과에서는 기체장보다 낮은 온도로 분사되는 분무에 의한

저온 영역의 모습이 나타나며, 3.75 [ms] 결과에서는 저온의 분무 영역 후방에서 점화에 의한 고온 영역이 발생하고 있음을 보여주고 있다. 이후 시

간이 흐르면서 저온의 분무 영역을 따라가며 화염이 성장하고 있는데, 이렇게 화염이 분무의 뒤에서 전파되어 오는 모습을 갖는 이유는 증발된 연

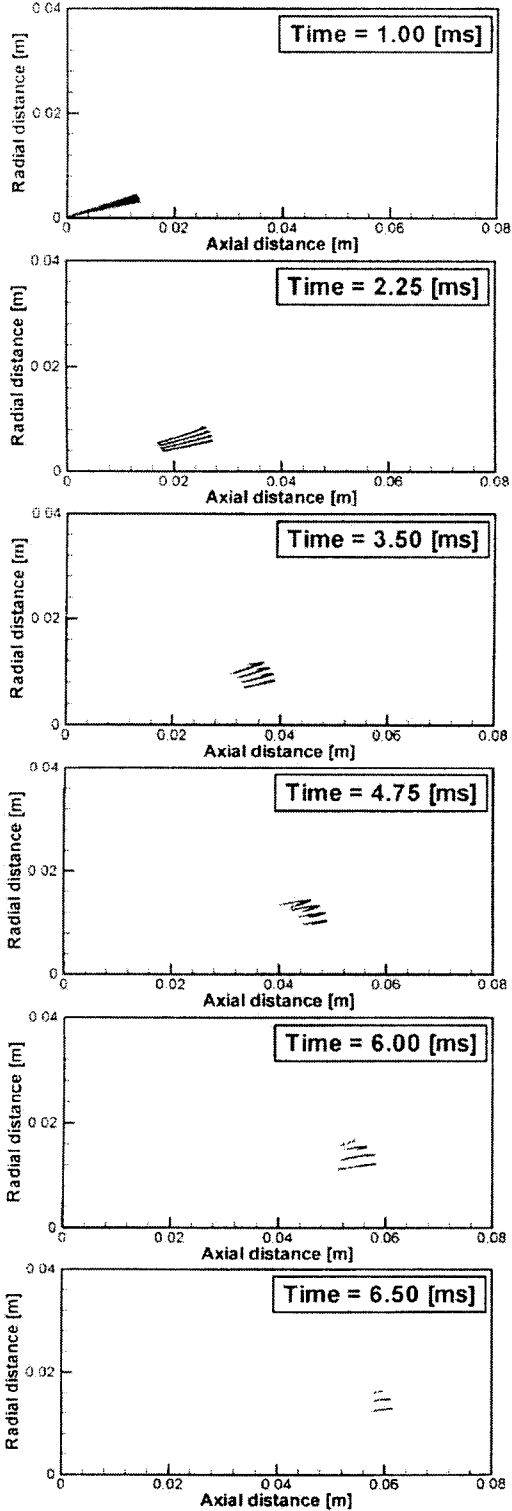


Fig. 4 Trajectory of spray (Pg = 1 [atm])

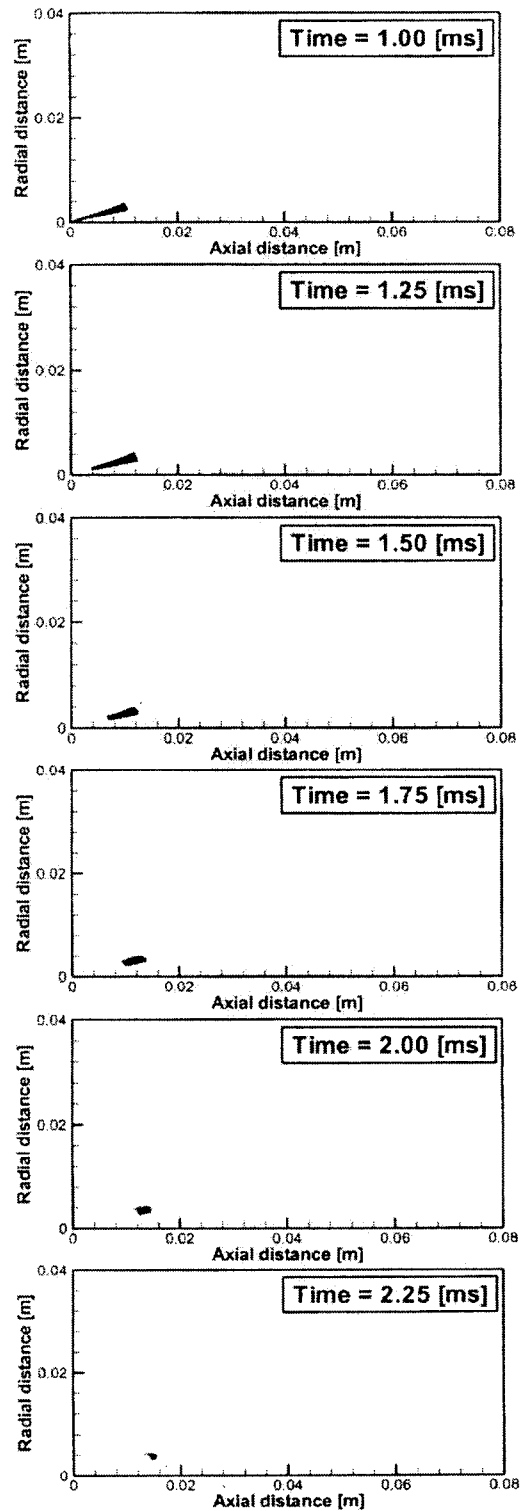


Fig. 5 Trajectory of spray (Pg = 20 [atm])

료와 주변 공기가 섞여서 가연 혼합기 상태가 되는데 시간이 소요되기 때문이며, 이는 분무 연소의 전형적 특성인 확산 화염을 나타내고 있다. Fig.

7은 분무가 고압 환경으로 분사되었을 때의 결과인데, 1.00 [ms]에서 이미 점화가 시작되어 고온의 영역이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 즉, 상압과

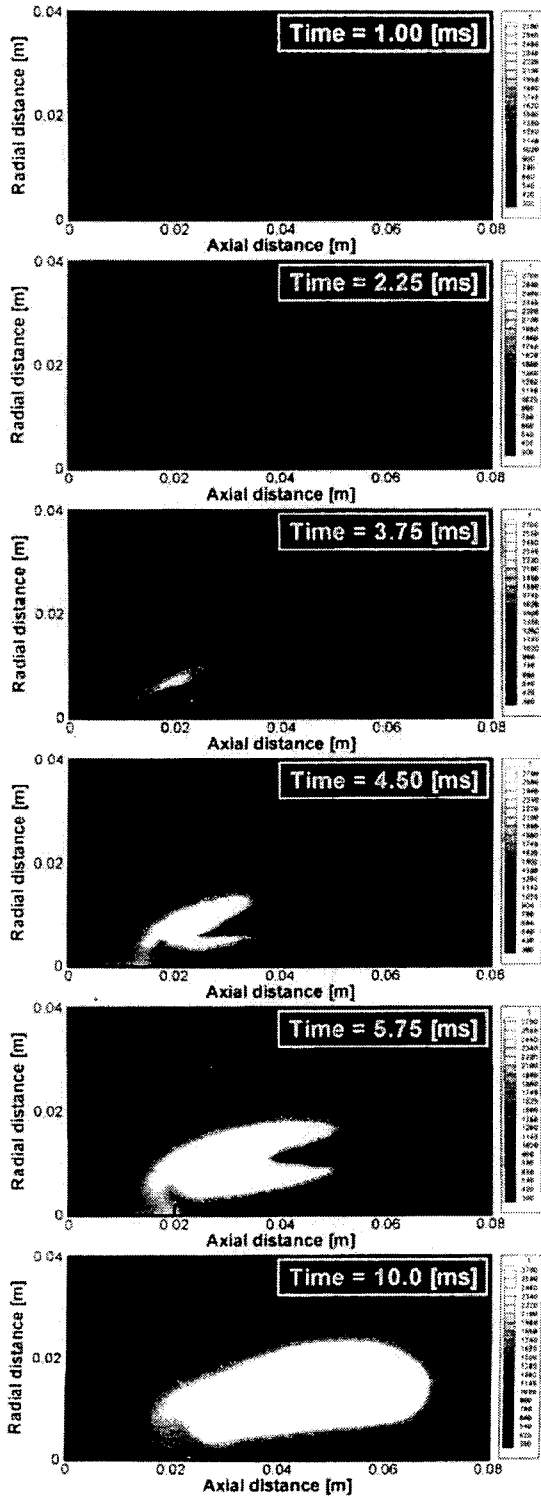


Fig. 6 Temperature distribution in gas field ($P_g = 1$ [atm])

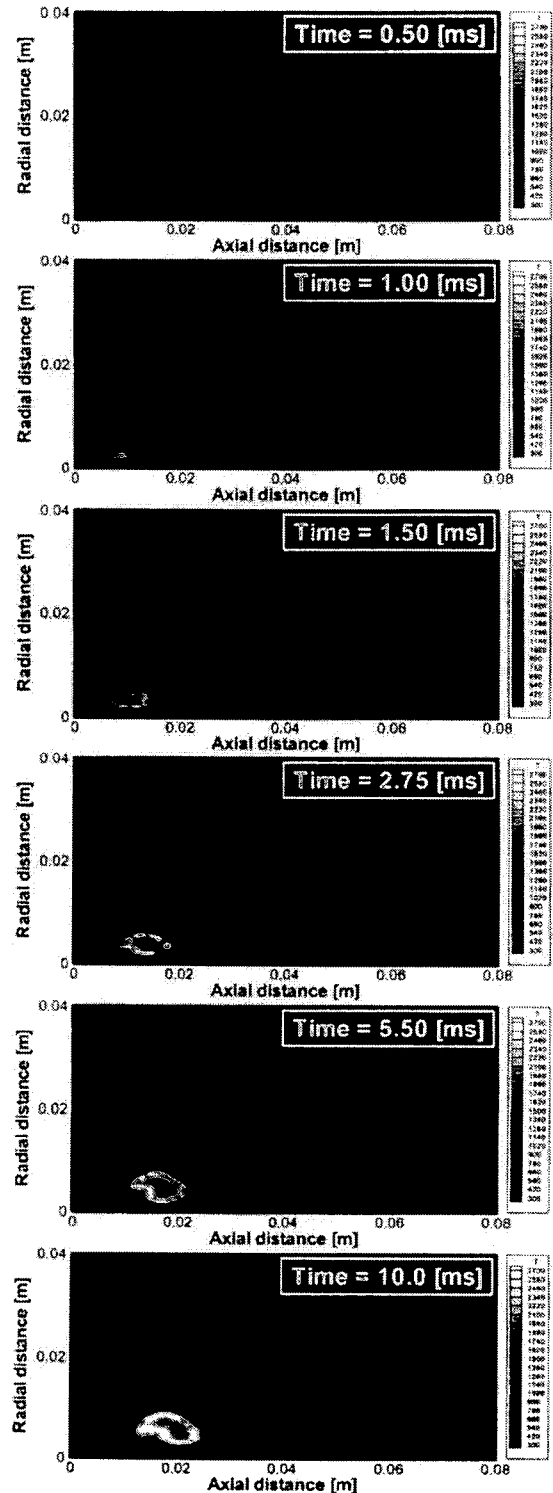


Fig. 7 Temperature distribution in gas field ($P_g = 20$ [atm])

비교할 때 고압 환경에서의 분무의 점화가 더 빨리 일어나게 되는데, 이는 고압 환경에서의 액적의 빠른 증발과 큰 반응을 때문이다. 또한, 앞에서

도 살펴본 바와 같이 고압에서의 분무 액적들이 상압에서의 그것들에 비하여 연소실 내 도달 거리가 짧으며 고온의 반응 영역이 상대적으로 좁게

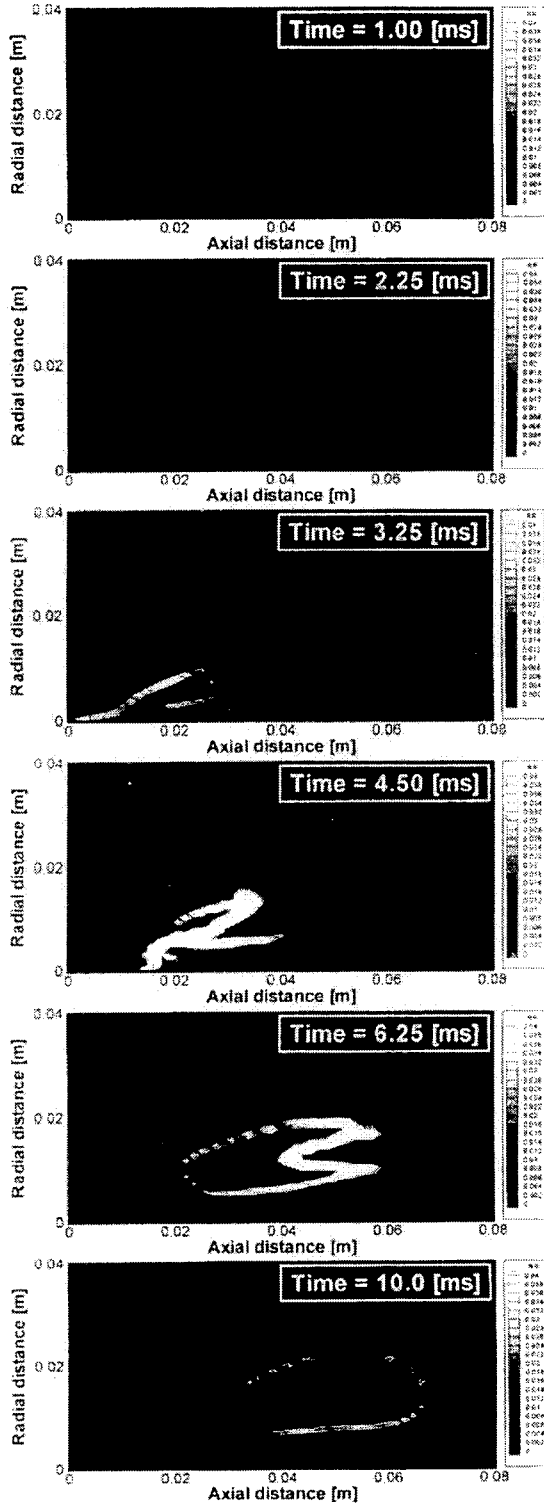


Fig. 8 Reaction rate distribution in gas field ($P_g = 1$ [atm])

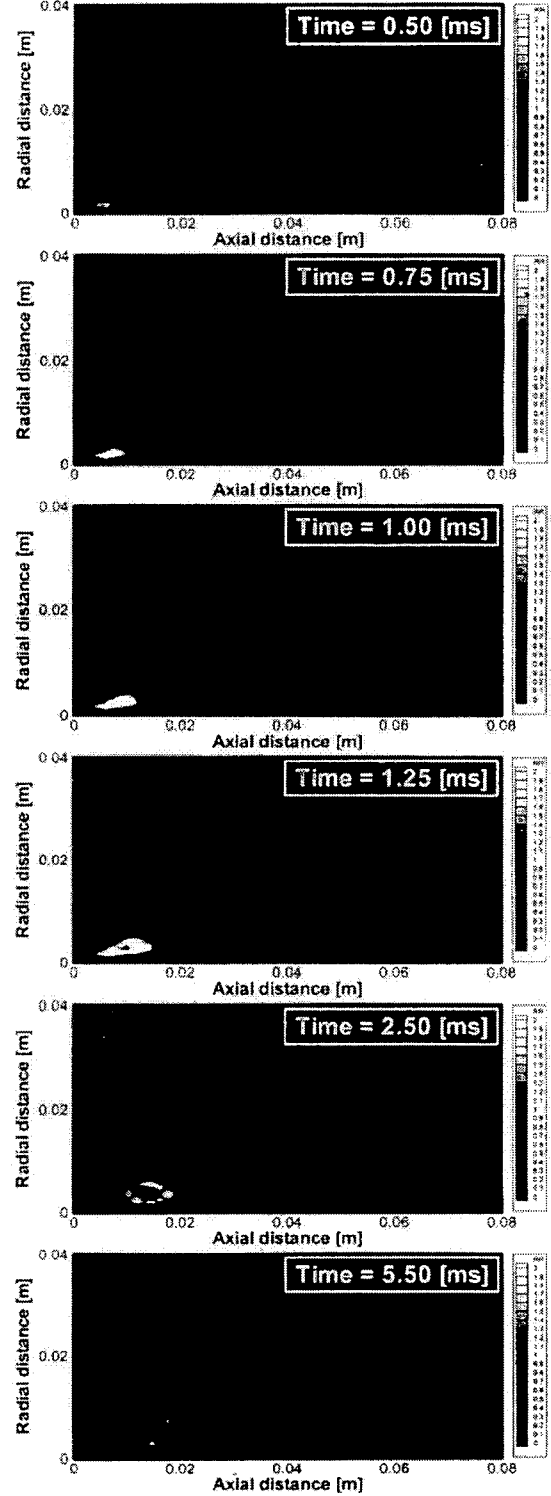


Fig. 9 Reaction rate distribution in gas field ($P_g = 20$ [atm])

형성되고 있음을 관찰할 수 있다.

5.3.2 기체장 내의 반응을 분포

연소실 내로 분사된 분무 액적들은 고온의 공기중으로 증발되고, 가연 혼합기를 이룬 후 반응을 시작한다. Fig. 8과 9는 기체장 내 반응률 분포의 변화를 나타낸다. Fig. 8은 상압에서의 결과인데, 분사 초기 분무 액적들을 둘러싸고 약한 반응이 일어나고 있다. 이는 고온의 기체장과 직접 접촉하고 있는 분무의 가장자리를 따라서 연료의 증발과 혼합이 이루어지기 때문이다. 3.25 [ms]에서는 비로소 점화라 할 수 있는 강한 반응이 분무의 후방 영역에서 나타나고 있으며, 이후 분무를 따라가면서 반응이 진행되어 가는 모습을 볼 수 있다. 고압 환경에서의 결과를 나타내는 Fig. 9에서는 0.75 [ms]에서 이미 강한 반응이 나타나는데, 이는 분무의 점화가 상대적으로 빨리 시작됨을 의미한다. 또한, 5.50 [ms]에서 미미한 반응만이 남아있는 것으로 보아 상대적으로 급격한 반응에 의하여 분무 액적들의 연소가 일찍 종료됨을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통해 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 분무 연소 시스템에 있어서 중요한 변수인 분무 침투 깊이는 상압에 비해 고압 환경에서 더 짧게 나타났는데, 이는 고압 환경에서의 분무의 짧은 생존 시간 및 분사 초기 분무 액적들에 미치는 상대적으로 큰 항력 때문이다.
- (2) 분무의 거동은 기체장 내의 온도 및 반응률 분포를 통해 조사되었는데, 상압에 비해 고압 환경에서의 분무의 점화 및 연소는 분사 초기의 짧은 시간 동안에 빠르고 급격히 일어나며, 또한 연소가 종료되는 시점도 더 빠르다. 이는 고압에서의 큰 반응률과 짧은 액적 생존 시간에 기인한다.
- (3) 고압 환경으로 분사된 분무는 상압에 비해 상대적으로 좁은 영역 내에서 연소가 완료되며, 따라서 고온의 화염 영역 또한 좁게 분포한다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 기관고유사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chiu, H.H., 2000, "Advances and Challenges in Droplet and Spray Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 26, pp. 381~416.
- (2) Aggarwal, S. K., 1998, "A Review of Spray Ignition Phenomena : Present Status and Future Research," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24, pp. 565~600.
- (3) Faeth, G. M., 1983, "Evaporation and Combustion of Sprays," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 9, pp. 1~76.
- (4) Jia, H. and Gogos, G., 1992, "Investigation of Liquid Droplet Evaporation in Subcritical and Supercritical Gaseous Environments," *J. Thermodynamics and Heat Transfer*, Vol. 6, No. 4, pp. 738~745.
- (5) Yang, A. S., Hsieh, W. H., Kuo, K. K., and Brown, J. J., "Evaporation of LOX Under Supercritical and Subcritical Conditions," *AIAA 93-2188*.
- (6) Wang, D. F. and Shaw, B. D., 1996, "Droplet Combustion in a Simulated Reduced Gravity Environment," *Combust. Sci. Tech.*, Vols. 113~114, pp. 451~470.
- (7) Oefelein, J. C. and Yang, V., 1999, "Modeling High Pressure Mixing and Combustion Processes in Liquid Rocket Engines," *J. Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, pp. 843~857.
- (8) Yang, V., 2000, "Modeling of Supercritical Vaporization, Mixing, and Combustion Processes in Liquid-Fueled Propulsion Systems," *28th Symposium (International) on Combustion*, pp. 925~942.
- (9) Bellan, J., 2000, "Supercritical (and Subcritical) Fluid Behavior and Modeling : Drops, Streams, Shear and Mixing Layers, Jets and Sprays," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 26, pp. 329~366.
- (10) Stapf, P., Dwyer, H. A., and Maly, R. R., 1998, "A Group Combustion Model for Treating Reactive Sprays in I.C. Engines," *27th Symposium (International) on Combustion*, pp. 1857~1864.
- (11) Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, John Wiley and Sons Incorporated.
- (12) Crowe, C. T., Sharma, M. P., and Stock, D. E., 1977, "The Particle-Source-In Cell(PSI-Cell) Model for Gas-Droplet Flows," *J. Fluids Engineering*, pp. 325~332.
- (13) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., 1984, "Chemical Kinetics Modeling of Hydrocarbon Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 10, pp. 1~57.
- (14) Gosman, A. D. and Ideriah, F. J. K., 1976, *TEACH-T : A General Computer Program for Two-Dimensional Recirculating Flow*, Imperial College, London, U. K.
- (15) Ranz, W. E. and Marshall, W. R., 1952, "Evaporation from Drops", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, No. 3, pp. 141~146.
- (16) Sato, J., Konishi, K., Okada, H., and Niioka, T., 1986, "Ignition Process of Fuel Spray Injected into High Pressure, High Temperature Atmosphere", *21th Symposium (International) on Combustion*, pp. 695~702.
- (17) Kang, S. H., 2000, "Investigation of Droplet Vaporization and Combustion in High Pressure Environments," Master Thesis Paper at KAIST
- (18) Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E., 1988, *The Properties of Gases and Liquids, Fourth Edition*, McGRAW-HILL.
- (19) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., 1984, Chemical Kinetics Modeling of Hydrocarbon Combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 10, pp. 1~57.