

연소실에 분사된 액적 간의 상호작용과 연소현상에 대한 수치적 연구

국정진*, 박승호**

A Numerical Study on Interaction and Combustion of Droplets Injected into a Combustor

J.J. Kook*, S.H. Park**

Key Words : Droplet Vaporization and Combustion, Ignition Delay Time, Droplets in Tandem Array

ABSTRACT

Vaporization, ignition and combustion of fuel droplets in tandem array are theoretically investigated to understand the droplet interactions in combustors. Including the effects of density variation in gas-phase, internal circulation and transient liquid heating, a numerical studies are performed by changing parameters such as initial droplet temperatures, initial droplet spacings, initial Reynolds numbers, surrounding gas temperatures, and activation energies of fuel vapors. Combustion regime maps classify the droplet combustion phenomena according to the configuration and location of the flame with respect to injection Reynolds numbers and surrounding gas temperatures. In addition, it is shown that the dynamic histories of droplets and ignition delay times are dependent on droplet size ratios and initial spacings of tandem droplets.

1. 서론

미립화 된 연료 액적의 증발, 점화, 연소과정은 가스터빈, ramjet, 디젤기관 및 로켓엔진 내에서의 주된 연소현상 중의 하나이다. 연소실에 분사된 액적의 연소과정이 해석대상과 방법에 따라 단일 액적의 연소, 액적 간의 상호작용, 그룹연소, 분사연소 등으로 단순화되어 이론적으로 관찰되고 있다.

본 연구에서는 연소실에 분사된 종렬로 배열된 두개의 액적 간의 상호작용이 액적의 증발, 점화, 연소에 이르는 제반과정에 미치는 영향을 이론적으로 해석하고자 한다.

Fig. 1은 액적의 분사방향과 평행인 방향으로 종렬배열(tandem array)된 액적에 대한 해석 모델을 설명하고 있다. 분사초기에 액적의 온도는 액적 전체에 걸쳐 균일하지만, 곧 고온, 고압의 주위기체로부터 에너지를 전달받게 된다. 에너지의 일부는 연료를 기화하는 데에 사용되어지고, 나머지는 액적

내부의 온도를 높이는 데 사용되어진다. 선두 액적에 의해 기화된 연료기체는 하류로 흘러가고, 하류 액적 주위를 감싸 하류 액적에서 증발된 연료기체와 섞이게 된다. 또한, 주위 기체 중 산소는 액적에서 기화되어 나온 연료와 혼합되어 발열반응을 일으키고, 점화가 일어난다. 이 과정에서 나타나는 여러 가지 유체역학적, 연소적 현상들은 연소실 설계와 연소효율 계산 등에 중요한 인자가 된다.

d^2 -law^[1]로 대표될 수 있는 단일 액적의 연소현상과 더불어, 실제 연소과정에서는, 액적 간 상호작용은 전체적인 연소 특성에 영향을 주는 중요한 인자 중 하나이다. 컴퓨터의 전산속도의 증가에 힘입어 1980년대 말부터 액적 상호작용의 영향에 대한 본격적인 연구가 행해지고 있다. 두 개의 액적 연소의 가장 단순한 경우로부터, 액적 그룹의 연소나 직선으로 나열된 액적 유동과 같은 좀 더 구체적인 연구가 행해지고 있다.

Umamura^[2]는 액적이 나란히 진행되는 경우 액적

* 홍익대학교 대학원

** 홍익대학교 기계공학과

간의 상호작용의 영향을 매개 변수를 이용하여 표현하였고, 액적의 연소 시간이 주로 주위 환경, 산소 농도와, 액적의 상대속도에 의해 영향을 받는다는 것을 보였다.

Abramzon과 Sirignano^[3]는 가변적인 열역학적 물성치, Lewis 수, Stefan 유동의 효과, 그리고 내부순환유동에 따른 액적내부가열의 효과를 포함하는 확장된 모델을 사용하여, 액적 유동현상과 증발현상을 수치적으로 해석하였다.

Chiang과 Sirignano^[4]는 초기 Re 수, 액적 간격, 액적 크기, 물성치에 대하여, 액적들이 충돌하는 지역을 나누는 임계 액적 크기비를 결정하였고, 선두 액적과 하류 액적에 대한 항력계수, Nusselt 수, Sherwood 수와의 상관 관계를 정리하였다.

본 연구에서는, 앞선 연구와 같이 액적과 액적의 상호작용이 액적 증발 및 유동현상 뿐만 아니라, 연소에 끼치는 영향도 관찰한다. 해석 대상연료를 옥탄(octane: C₈H₁₈)으로 하고, 온도 1200~1700K, 압력10기압의 공기 속으로 분사되어 나란히 진행되는 두 개의 액적의 연소과정을 수치적으로 연구한다. 다양한 Re 수와 주위 온도에 대하여 점화지연시간과 점화이후 생성화염의 형태를 비교하고, 그에 따른 연소의 특성을 파악하고, 액적의 직경비, 액적 간격 등을 변화시키면서 각각의 영향을 연구한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 Fig. 1에서 보여진 것과 같이 두 개의 액적이 유동방향을 따라 종렬로 분사된 경우의 연소현상을 해석한다.

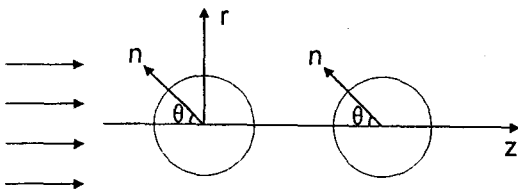


Fig. 1 Coordinate system for the combustion of tandem droplet arrangement.

지배방정식은 기체 및 액체에 대하여 기상에서

질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존방정식과 액상에서의 와도, 유선함수 및 에너지 보존방정식을 벡터의 형태로 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{\partial S}{\partial z} + H \quad (1)$$

여기서, 기상 (gas-phase)에 대하여는

$$Q = \begin{bmatrix} \rho r \\ \rho r V_r \\ \rho r V_z \\ \rho r C_p T \\ \rho r Y_f \\ \rho r Y_o \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho r V_r \\ \rho r V_r V_r + rP \\ \rho r V_r V_z \\ \rho r C_p V_r T \\ \rho r V_r Y_f \\ \rho r V_r Y_o \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho r V_z \\ \rho r V_z V_r \\ \rho r V_z V_z + rP \\ \rho r C_p V_z T \\ \rho r V_z Y_f \\ \rho r V_z Y_o \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4}{3} \mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \\ \frac{1}{3} \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \\ rk \frac{\partial T}{\partial r} \\ \rho D \frac{\partial Y_f}{\partial r} \\ \rho D \frac{\partial Y_o}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S = \begin{bmatrix} \mu \left[\frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{1}{3} \frac{\partial V_r}{\partial r} \right] \\ \frac{4}{3} \mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \\ rk \frac{\partial T}{\partial z} \\ \rho D \frac{\partial Y_f}{\partial z} \\ \rho D \frac{\partial Y_o}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ P - \frac{4}{3} \frac{\mu V_r}{r} \\ 0 \\ r \dot{W}_f \Delta H \\ r \dot{W}_f \\ r \dot{W}_o \end{bmatrix}$$

이다. 이상기체 방정식은

$$P = \rho RT \quad (3)$$

이고, 액상 (liquid-phase)에 대하여는

$$Q = \begin{bmatrix} \rho r \omega \\ 0 \\ \rho r C_p T \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} \rho \frac{\partial \Psi}{\partial z} \omega \\ 0 \\ \rho C_p \frac{\partial \Psi}{\partial z} T \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -\rho \frac{\partial \Psi}{\partial r} \omega \\ 0 \\ -\rho C_p \frac{\partial \Psi}{\partial r} T \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} r \frac{\partial}{\partial r} (\mu \omega) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \\ rk \frac{\partial T}{\partial r} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} r \frac{\partial}{\partial z} (\mu \omega) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \\ rk \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \frac{\mu \omega}{r} + \rho \frac{\partial \Psi}{\partial z} \omega \\ -\omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이고, 여기서, $V_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}$ 이고, $V_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}$ 이다.

2.2 초기 및 경계 조건

2.2.1 초기 조건

기상에서의 초기 조건은,

$$V_r = Y_f = 0, P = P_\infty, T = T_\infty \tag{5}$$

$$V_z = V_\infty, Y_o = Y_{o\infty}$$

이고, 액상에서는 다음과 같다.

$$\omega = \Psi = 0, T = T_o \tag{6}$$

2.2.2 액적 표면 경계조건

액적 표면에서의 경계조건은 연속방정식, 화학종 보존방정식, 열역학적 평형에 의해 다음과 같다.

접선 방향 속도

$$V_{g\theta} = V_{i\theta} \tag{7}$$

전단력

$$\begin{aligned} \mu_g \left(\frac{\partial V_{g\theta}}{\partial n} - \frac{V_{g\theta}}{a} + \frac{1}{a} \frac{\partial V_{gn}}{\partial \theta} \right) \\ = \mu_l \left(\frac{\partial V_{l\theta}}{\partial n} - \frac{V_{l\theta}}{a} + \frac{1}{a} \frac{\partial V_{ln}}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \tag{8}$$

에너지 보존

$$\rho_l C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} + \rho_g V_{gn} L \tag{9}$$

온도

$$T_g = T_l \tag{10}$$

화학종 보존

$$\rho_g D \left[\frac{\partial Y_o}{\partial y} \right]_s = \rho_g U_n Y_{os} \tag{11}$$

$$\rho_g D \left[\frac{\partial Y_f}{\partial y} \right]_s = \rho_g U_n (Y_{fs} - 1) \tag{12}$$

와도

$$\omega_s = \frac{\mu_g}{\mu_l} \left[\frac{\partial V_{g\theta}}{\partial n} - \frac{V_{g\theta}}{a} + \frac{1}{a} \frac{\partial V_{gn}}{\partial \theta} \right]_s - 2 \frac{\partial V_{l\theta}}{\partial n} \Big|_s \tag{13}$$

연료농도

표면 연료 농도는 증발된 연료와 공기가 액적 표면에서 상평형을 유지한다고 가정하여 Clasius - Clapeyron 관계식을 이용하면,

$$P_f = P_r \text{EXP} \left[\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \tag{14}$$

$$X_{fs} = \frac{P_r}{P_t} \text{exp} \left[\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \tag{15}$$

$$Y_{fs} = \frac{X_{fs} M_f}{X_{fs} M_f + (1 - X_{fs}) M_o} \tag{16}$$

이 된다. 이때, 주위 압력이 임계 압력보다 충분히 작으므로 이상기체로 가정하고, 증발 잠열이 일정하다고 가정한다.

2.2.3 외부 경계 조건

기상에서의 외부경계조건 및 액상과 기상에서의 대칭축 경계조건은 다음과 같다.

외부 유입 영역

$$\begin{aligned} V_r = Y_f = 0, P = P_\infty, T = T_\infty \\ V_z = V_\infty, Y_o = Y_{o\infty} \end{aligned} \tag{17}$$

외부 유출 영역

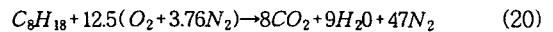
$$\frac{DV_r}{Dt} = \frac{DV_z}{Dt} = \frac{DT}{Dt} = \frac{DP}{Dt} = \frac{DY_f}{Dt} = \frac{DY_o}{Dt} = 0 \tag{18}$$

대칭축 경계조건

$$\begin{aligned} V_r = \frac{\partial V_z}{\partial \theta} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{\partial Y_f}{\partial \theta} = \frac{\partial Y_o}{\partial \theta} = 0 \\ \Psi = \omega = 0 \end{aligned} \tag{19}$$

2.3 화학 반응

본 연구에서 사용한 연료인 옥탄과 공기와의 이 상적인 반응은 아래와 같다.



식 (2)에서의 반응을 향한 \dot{W}_f''' 는 아래와 같이 이 차 반응 모델 (global 2nd order model)을 사용하여 계산하였다.

$$\dot{W}_f''' = -\rho_g^2 Y_f Y_o A_r \text{exp} \left(\frac{-E_f}{RT} \right) \tag{21}$$

2.4 항력의 계산

액적은 유동 중에 표면 역압력 분포와 주위 공기에 의한 표면 전단 저항 및 blowing에 의한 추력을 받아 점차 속도가 감소하게 된다. 표면 압력, 전단력 및 blowing에 의한 항력은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$F_p = -2\pi \int_0^\pi Prz \, d\theta \quad (22)$$

$$F_s = 2\pi \int_0^\pi \mu_g \left[\left(\frac{\partial V_{g,\theta}}{\partial n} - \frac{V_{g,\theta}}{a} + \frac{1}{a} \frac{\partial V_{g,n}}{\partial \theta} \right)_s \sin \theta - \frac{1}{3} \left(2 \frac{\partial V_{g,n}}{\partial n} - \frac{2V_{g,n}}{a} - \frac{1}{a} \frac{\partial V_{g,\theta}}{\partial n} - \frac{V_{g,\theta}}{a} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right)_s \cos \theta \right] r a \, d\theta \quad (23)$$

$$F_m = 2\pi \int_0^\pi \rho_g V_{g,n} (V_{g,\theta} \sin \theta - V_{g,n} \cos \theta) r a \, d\theta \quad (24)$$

따라서, 전체 항력은

$$F_t = F_p + F_s + F_m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_i \alpha \quad (25)$$

이고 이를 이용하여 액적의 감속가속도 a 를 구할 수 있다.

2.5 증발에 의한 반경의 감소

액적 연료는 주위 고온의 공기에 의한 열전달과 이로 인한 증발로써 연료 액적의 반경이 감소하게 된다. 액적의 반경감소율은 액적의 표면에서의 질량 보존을 이용하여 구하게 된다. 액적 표면에서 단위 면적당 증발율은

$$\dot{m}'' = \rho_g V_{g,n} Y_k - \rho_g D \frac{\partial Y_k}{\partial n} \Big|_s \quad (26)$$

이고, 액적 전체의 증발율은

$$\dot{M} = 2\pi a \int_0^\pi \dot{m}'' r \, d\theta = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi a^3 \rho_i \right) \quad (27)$$

이다. 따라서, 식(27)은

$$\rho_i \frac{d(a^3)}{dt} = \int_0^\pi \left(\rho_g V_{g,n} Y_k - \rho_g D \frac{\partial Y_k}{\partial n} \Big|_s \right) r \, d\theta \quad (28)$$

이 되고, 이를 이용하여 매시간 계산마다 반경의 감소를 계산하여 격자를 수정한다.

2.6 수치해석

변수들의 크기 차에 의한 계산 오차를 줄이고, 결과의 고찰을 일반적으로 하기 위해 무차원 변수를 도입하여 지배 방정식들을 무차원화 하였다. 액적이 전 수명 시간 동안 구형을 유지한다는 가정 하에 원통좌표계에서 서술된 지배 방정식을 일반 좌표계에서의 방정식으로 전환하여 해석한다. 서로 연관되어 있는 연속, 운동량, 에너지 및 화학종 보

존 방정식들을 충분히 작은 시간 구간에서 순차적으로 반복해서 푸는 방법을 사용하였다. 운동량 방정식, 와도 방정식, 에너지 방정식 및 화학종 방정식을 푸는 데는 ADPC방법^[5-7]을 사용하였고, 유선의 분포와 압력 수정은 SOR방법으로 해석하였다. 그 외에 액적 표면에서의 값과 운동량 방정식의 일부는 Explicit 방법으로 풀었다. 본 수치 해석에서는 엇갈림 격자계를 사용한다. 압력은 엇갈림 격자에서 구하였고, 나머지 속도와 온도 등의 값은 원래의 격자에서 계산하였다.^[7,8] 수렴 조건은 압력 수정값(δP)이 10^{-5} 보다 작은 경우로 결정하였다. 격자의 생성은 TOMCAT CODE^[9]를 사용하여 Boundary Fitted Coordinated System을 생성하였고, 생성된 격자계는 Fig. 2와 같다.

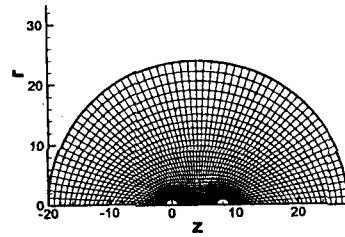


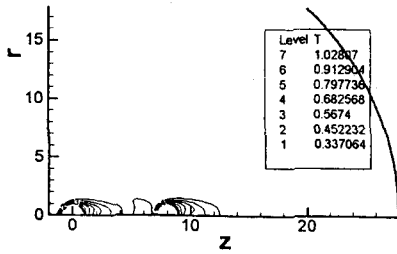
Fig. 2 Grid lines for Droplets in Tandem Array for $R_{LD} = R_{DD} = 1.0$ and $S_{C-C} = 8.0$.

3. 결과 및 토의

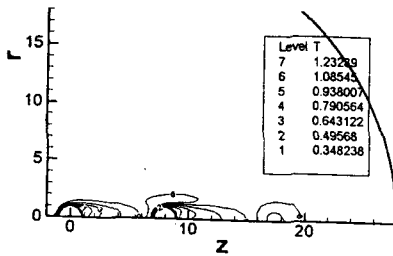
3.1 온도분포의 변화

본 연구에서 사용되고 있는 변수들의 값을 Table 1에 정리하였다. Fig. 3은 액적이 분사된 이후 시간의 변화에 따른 온도분포의 발달을 설명한다. Figs. 3(a),(b),(c)는 무차원 시간이 각각 0.1383, 0.2595, 0.3843일 때의 등온선을 나타낸 것으로서, 하류 액적 후미에서의 화염핵의 발생 및 성장과정을 보여준다. 주변의 온도는 무차원온도 $\theta_\infty = 1$ 이나 일부 영역의 온도는 1보다 크므로 연소에 의하여 온도가 주변보다 높아짐을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 액적 주위의 기상에서 각 시간에 따른 최고 온도의 추이를 보여준다. 초기에 최고온도는 주변온도 $\theta_\infty = 1$ 과 거의 비슷하나 일정시간이 흐른 후에 급격히 증가함을 보이고 이후 일정수준의 온도를 유지하고 있다. 이 과정에서 온도가 급격히 증가하는 부분에서 점화가 되고, 온도곡선의 변곡점을 점화지

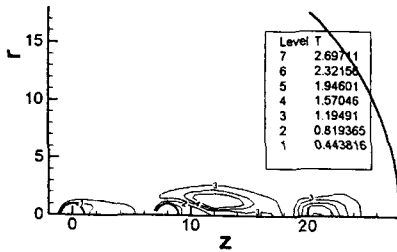
연점 (ignition delay point)이라 할 수 있다.



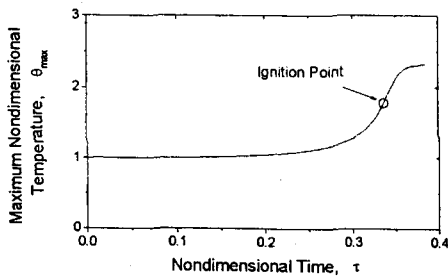
(a) Temperature contours at $\tau_{hg} = 0.1383$



(b) Temperature contours at $\tau_{hg} = 0.2595$



(c) Temperature contours at $\tau_{hg} = 0.3843$



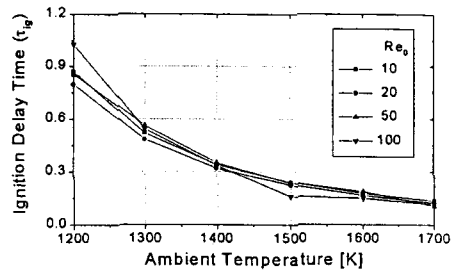
(d) Maximum Temperature Variation

Fig. 3 Temperature contours and profiles for $Re_0=100$, $T_\infty=1400K$, $E_r=30kcal/mole$, $T_0=380K$.

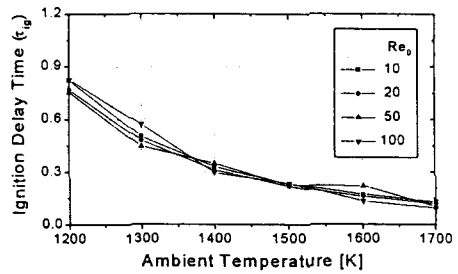
3.2 액적 크기비의 영향

3.2.1 점화지연시간

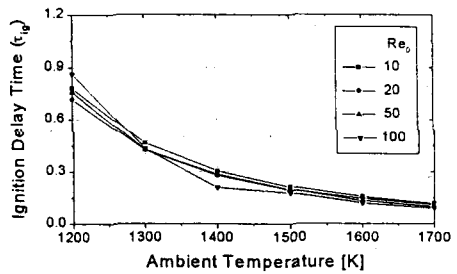
주변온도와 초기 Re 수, 액적의 상대적 크기 및 점화지연시간과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 액적의 크기가 같은 경우 (Fig. 4(a))보다는 액적의 크기가 서로 다른 경우 (Fig. 4(b),(c))에 점화지연시간이 약간 감소하였다. 점화지연시간은 주위 온도에 매우 밀접한 관계를 가지고 있으나, 초기 Re 수에는 큰 영향을 받지 않았다.



(a) $R_{LD} = R_{DD} = 1$ and $S_{C-C} = 8$



(b) $R_{LD} = 0.5$, $R_{DD} = 1$, and $S_{C-C} = 8$



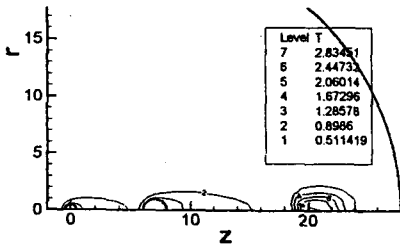
(c) $R_{LD} = 1$, $R_{DD} = 0.5$, and $S_{C-C} = 8$

Fig. 4 Ignition delay times for $E_r = 25kcal/mole$ and $T_0 = 380K$.

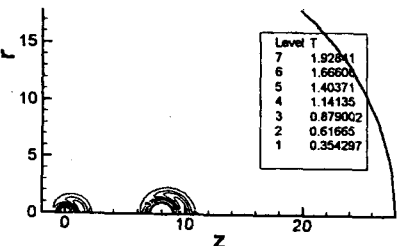
3.2.2 화염 형태의 분류

분사된 액적 주위에서의 화염 발생 위치에 따라 연소현상을 다음과 같이 특징 지을 수 있다.

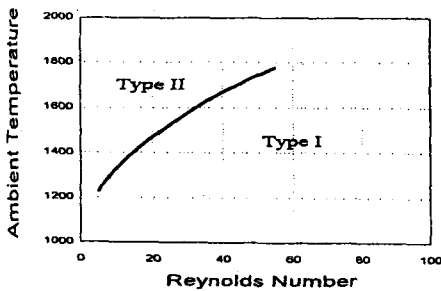
Fig. 5는 선두 액적이 하류 액적보다 작을 때, 화염의 형태를 두 가지로 구분할 수 있음을 보인다. 액적직경의 차이로 인하여, 선두 액적에서 증발되어 나온 연료의 양은 하류 액적에서 증발된 양보다 상당히 적다. 이 경우에 선두 액적은 점화와 연소의 기여도가 적고, 상대적으로 하류 액적이 단일 액적의 경우처럼 행동하며 점화와 연소를 지배하는 주된 인자로 작용할 수 있다. Re 수가 크고, 주변온도가 낮을 때에는 액적 후미에 주 연소가 일어나나 (Fig. 5(a)), Re 수가 작고 주변온도가 낮을 경우에는 정지된 단일 액적의 연소현상과 유사하다 (Fig. 5(b)). 이를 주변온도 및 초기 Re 수에 따라 연소 영역을 도시하면 Fig. 5(c)와 같다.



(a) Flame for $Re_o=50, T_\infty=1200K$ (Type I)



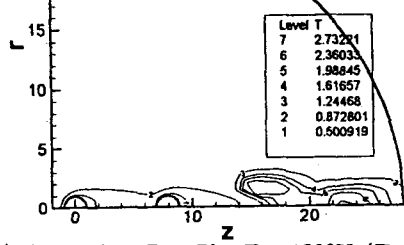
(b) Flame for $Re_o=10, T_\infty=1700K$ (Type II)



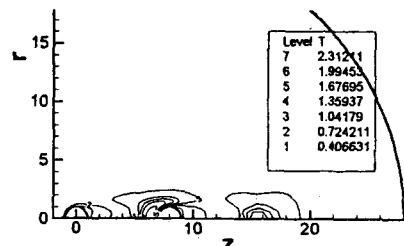
(c) Combustion Domains

Fig. 5 Ignition and combustion for $R_{LD} = 0.5$, $R_{DD} = 1$, and $S_{C-C} = 8$ [$E_r=25kcal/mole, T_o=380K$]

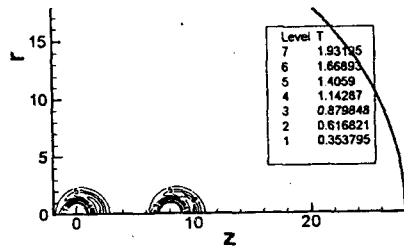
선두 액적과 후미 액적의 초기 직경이 서로 같을 때에는 세 가지의 화염형태가 나타나게 되고, 각각의 화염형태를 Fig. 6에 도시하였다.



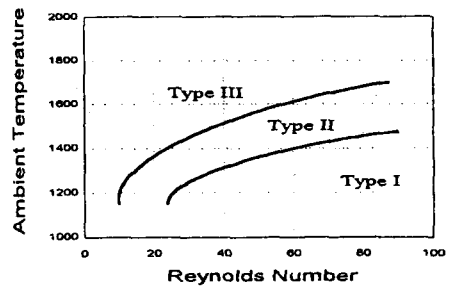
(a) Flame for $Re_o=50, T_\infty=1200K$ (Type I)



(b) Flame for $Re_o=50, T_\infty=1300K$ (Type II)



(c) Flame for $Re_o=10, T_\infty=1700K$ (Type III)



(d) Combustion Domains

Fig. 6 Ignition and combustion for $R_{LD} = 1$, $R_{DD} = 1$ and $S_{C-C} = 8$ [$E_r=25kcal/mole, T_o=380K$]

Re 수가 크고 주위 온도가 낮을 때에는, 상류 액적에서 기화된 연료가 하류 액적 뒤에서, 하류 액적에서 기화된 연료와 합쳐져, 점화는 하류 액적의 후미

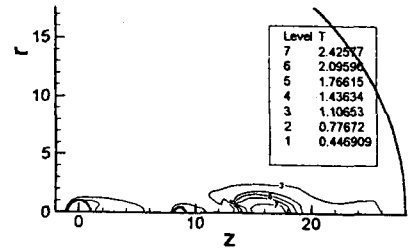
에서 일어나게 된다 (Fig. 6(a)). Re 수가 낮고, 주위 온도가 높은 경우, 액적들은 상호 작용이 적어져서 점화는 액적을 둘러싸는 액적 연소의 형태를 띄고, 화염은 액적을 덮거나, 각각의 후류 영역에 머물게 된다 (Fig. 6(c)). 또한, 비교적 중간의 영역에서는 상류 액적에서 기화된 연료가 하류 액적의 뒤로 가지 못하고 앞에서 정체되면서, 하류 액적을 둘러싸면서 점화가 일어나고, 하류 액적에서 기화된 연료는 하류 액적의 후미에서 화염이 발생한다 (Fig. 6(b)). 이에 대한 연소영역은 Fig. 6(d)에 나타나 있다.

Fig. 7은 선두 액적이 후미 액적보다 크기가 더 클 때인데, 이 경우는 비교적 많은 현상이 발생한다. Re 수가 크고, 주위 온도가 작은 경우, 선두 액적에서 기화된 연료는 빠른 속도로 하류 액적에서 기화된 연료를 따라 잡아 서로 섞이며 화염이 발달한다 (Fig. 7(a)). 이보다는 약간 Re 수가 작거나, 주위온도가 큰 경우에는, 선두 액적에서 기화된 연료가 하류 액적을 뒤덮으면서 점화가 일어나고, 그 화염은 하류 액적에서 기화되어 나온, 상대적으로 적은 양의 연료와 뒤섞이며 넓은 범위의 화염이 발생하게 된다 (Fig. 7(b)). 더욱 더 Re 수가 작아지고, 주위온도가 높아지게 되면 점화는 선두 액적과 하류 액적의 중간에서 일어나게 되고, 이는 각각의 액적에 대한 wake 화염으로 볼 수 있으며, 그 화염의 범위는 상대적으로 좁고 액적 간에 큰 영향을 미치지 않는다 (Fig. 7(c)). 마지막으로 아주 낮은 Re 수와 높은 주위 온도 속으로 분사된 액적들은 선두 액적을 뒤덮는 정지 단일액적 연소가 일어나게 된다 (Fig. 7(d)). 이에 대한 연소영역을 Fig. 7(e)에 구분하였다.

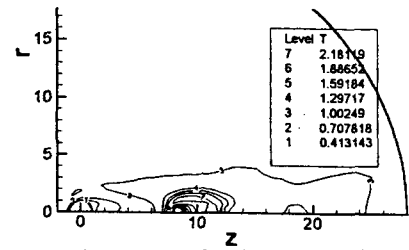
Fig. 8은 활성화 에너지가 30kcal/mole이고, 액적 초기 온도가 380K일 때의 연소 형태 분류이다. 이 때 화염의 형태는 Fig. 6과 동일한 형태를 나타내나, 활성화 에너지가 상대적으로 크기 때문에 화염이 하류 액적의 후미에서 일어나는 경우가 훨씬 증가 하였다 (Type I). 즉 대류의 영향이 증가함을 알 수 있다.

3.2.3 시간에 따른 액적 간격의 변화

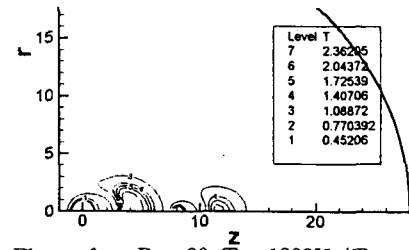
Fig. 9는 액적의 크기가 다른 경우에 시간에 경과에 따른 액적 간격의 변화를 보여준다. 액적 간격이 액적 반경의 8배일 경우⁽⁴⁾, 액적 간격의 변화는 초기 Re 수가 낮은 경우에는 거의 변화가 없으나,



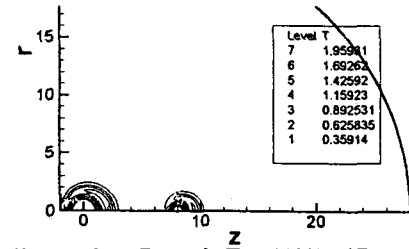
(a) Flame for $Re_0=100, T_\infty=1300K$ (Type I)



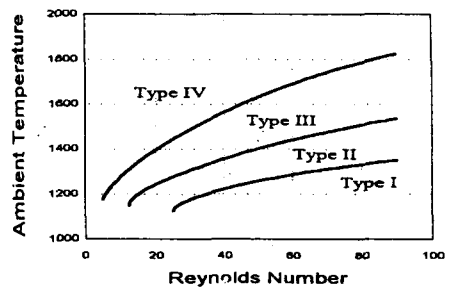
(b) Flame for $Re_0=100, T_\infty=1400K$ (Type II)



(c) Flame for $Re_0=20, T_\infty=1300K$ (Type III)



(d) Flame for $Re_0=10, T_\infty=1700K$ (Type IV)



(e) Combustion Domains

Fig. 7 Ignition and combustion for $R_{LD} = 1$,
 $R_{DD} = 0.5$ and $S_{C-C} = 8$
 $[E_r=25kcal/mole, T_0=380K]$

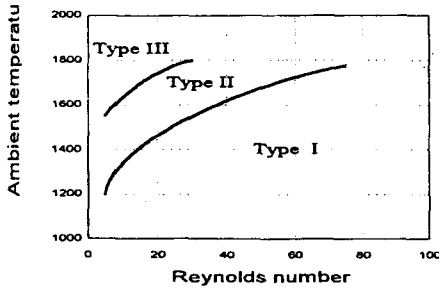
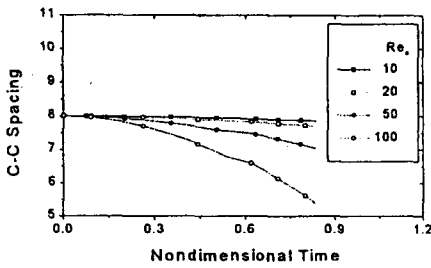
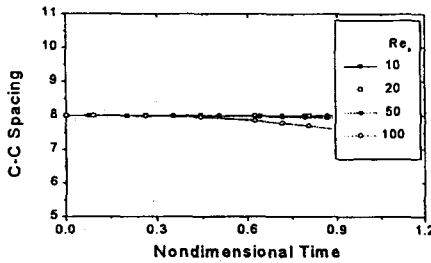


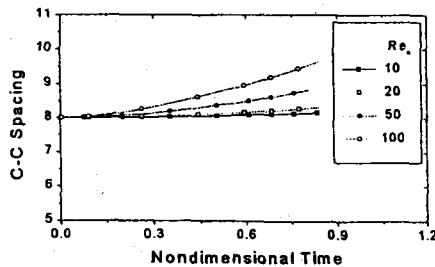
Fig. 8 Combustion regime for $R_{LD} = 1$, $R_{DD} = 1$ and $S_{C-C} = 8$ [$E_r=30\text{kcal/mole}$, $T_o=380\text{K}$]



(a) $R_{LD} = 0.5$, $R_{DD} = 1$ and $S_{C-C} = 8$



(b) $R_{LD} = 1$, $R_{DD} = 1$ and $S_{C-C} = 8$



(c) $R_{LD} = 1$, $R_{DD} = 0.5$ and $S_{C-C} = 8$

Fig. 9 Variation of spacing between droplets for $T_\infty=1200\text{K}$, $E_r=25\text{kcal/mole}$, $T_o=380\text{K}$.

초기 Re 수가 커질수록 액적간의 간격이 변한다. 특히, 액적의 크기가 서로 다를 경우, 액적 간격은 시간이 지남에 따라 변화가 심해진다. 선두의 액적이 하류의 액적보다 작을 경우 (Fig. 9(a)) 액적 간격은 줄어들고, 큰 경우 (Fig. 9(c))에는 간격은 증가하게 된다. 이는 상대적으로 액적의 크기가 작을수록 항력이 크기 때문이다.

3.3 초기 액적 간격의 변화

동일크기의 액적이 분사되었을 때, 초기 액적 간격에 대한 점화지연시간의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 초기 Re 수가 큰 경우에는, 초기 액적 간격이 작을 때 점화지연시간이 서로 비슷하지만, 거리가 7을 넘어서면, 액적 간격이 커질 수록 점화지연시간은 줄어든다. 이는 액적 간의 상호작용이 있을수록 점화지연시간이 길어짐을 의미한다. Re 수가 작은 경우에는 점화지연시간은 초기 액적 간격에 관계없이 일정하다. 이는 Re 수가 작으면, 액적 간의 상호작용이 적어져 서로의 영향을 받지 않고, 단일액적처럼 연소를 하기 때문이다.

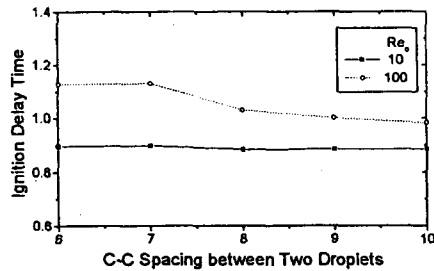


Fig. 10 Ignition delay time for initial droplet spacings [$E_r=25\text{kcal/mole}$, $T_o=380\text{K}$, $T_\infty=1200\text{K}$]

Fig. 11에서는 액적 간격의 변화가 시간에 경과에 따라 비교적 일정한 것을 알 수 있다. 그러나 이는 점화가 일어났을 때까지만 계산한 것으로, 점화가 일어나지 않고 증발만 일어난다면, 시간의 흐름에 따라 액적이 가까워지는 속도는 증가할 것이다. 즉, 하류 액적이 선두 액적의 후류에 의한 영향을 받을 수록, 하류 액적은 항력이 줄어들어 급속히 가까워진다. 이때 액적 직경은 서로 동일하고 초기 Re 수는 100이다.

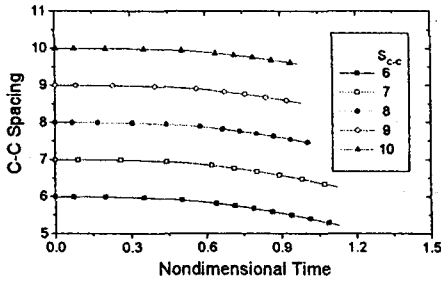


Fig. 11 Variation of spacing between droplet for various initial droplet spacing
 [$E_r=25\text{kcal/mole}$, $T_0=380\text{K}$, $T_\infty=1200\text{K}$]

4. 결론

고온 고압의 연소실에 증류로 분사된 연료 액적 간의 제반 연소현상에 대한 상호작용을 수치적으로 해석하였다.

주위 온도가 높으며 초기 Re 수가 작은 경우에 enveloped 화염이 액적을 감싸고 점화 지연 시간은 다른 경우에 비해 작다. 주위 온도가 낮아지고, Re 수가 점점 커지면 화염은 액적을 감싸지 않고 액적 후미에 위치하게 되는 wake화염이 나타나게 된다. 강제 대류의 영향이 커지면 점화는 액적 후미에서 멀리 떨어진 곳에서 일어나므로, 이 경우는 뒤따르는 액적에 영향을 주게된다.

액적간 상호작용에 대한 연구 결과로는 일정한 액적 간격에서는 초기 Re 수가 크고 주위 온도가 작을수록 액적 간 상호작용은 커지고, 이 영향으로 점화지연시간은 변화가 오게 된다. 또한, 이 두 인자는 서로 복합적으로 액적의 점화 지연 시간에 영향을 주고, 화염의 형태는 다양하게 변화한다.

액적의 크기에 따른 화염의 변화는 선두 액적의 크기에 많은 영향을 받는다. 하류 액적의 크기에 따른 연소현상의 변화는 상대적으로 미약하며, 선두 액적에서 기화되어 나온 연료와 만날 때에 연소률도와 화염은 넓은 범위에 걸쳐 분포하게 된다.

액적의 크기는 액적의 항력에 영향을 미쳐, 액적의 크기가 작으면 항력을 더 많이 받는다. 따라서 액적의 크기가 서로 같은 경우, 액적 간격의 변화는 비교적 적었으나, 선두 액적이 크면 간격은 멀어지고, 작으면 가까워진다.

초기 액적 간격은 고 Re 수일 때, 중요한 인자가 된다. 저 Re 수 유동에서는 액적 간의 상호작용이

거의 없으므로, 액적 간격은 점화지연시간에 영향을 주지 않지만, 고 Re 수에서는 액적간의 상호작용이 커지므로 간격이 가까워질수록 점화지연시간이 증가하였다.

Table 1 The basic parameters used in this analysis.

Parameter	Value
Pressure [atm]	10.0
Molecular weight, oxidizer [g/mole]	28.97
Molecular weight, fuel, n-octane [g/mole]	114.23
Arrhenius coefficient [m^3/kgsec]	1.0×10^9
Initial droplet temperature [K]	380
Specific heat of fuel, n-octane [J/kgK]	2177
Latent heat [kJ/kg]	301.5
Oxygen-fuel ratio	3.5
Prandtl number, liquid phase	8.0
Viscosity, liquid phase [Nsec/m^2]	5.4×10^{-4}
Density, liquid phase [kg/m^3]	720
Heat of reaction [kJ/kg]	4.48×10^4
Activation energy [kcal/mole]	25

기호 설명

- A_r : Arrhenius coefficient
- C_p : specific heat
- D : diameter
- E_r : activation energy
- F_w : thrust drag force
- F_p : pressure drag force
- F_f : friction drag force
- F_t : total drag force
- L : latent heat of vaporization
- \dot{m}'' : mass evaporation rate
- M : molecular weight
- n : oxygen-fuel ratio
- R : universal gas constant, droplet radius
- S_{c-c} : spacing between droplets
- \dot{W}'' : reaction rate
- X : mole fraction
- Y : mass fraction

그 리 스 문 자

α	: acceleration
ΔH	: heat of reaction
τ	: nondimensional time
ω	: vorticity
Ψ	: stream function

하 첨 자

$C-C$: center to center
D	: diameter
DD	: downstream droplet
f	: fuel
g	: gas phase
h	: hydrodynamic
hg	: gas phase hydrodynamic
ig	: ignition
l	: liquid phase
LD	: leading droplet
n	: normal direction
o	: initial state, oxygen
r	: reference state, radial direction
s	: surface, separation, shear stress
z	: axial direction
∞	: free stream

후 기

이 논문은 1995년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비 (과제번호:01-E-0997)에 의하여 연구되었음을 밝히고, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

[1] C. K. Law, "Recent Advances in Droplet Vaporization and Combustion," Prog. Energy Combustion Science, Vol. 8, pp. 171~201, 1982.

[2] A. Umemura, "A Theoretical Study on the Unsteady, Interactive Combustion of a Linear Fuel Droplet Stream," Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1445~1453, 1990.

[3] B. Abramzon and W. A. Sirignano, "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculations," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp.1605~1618, 1989.

[4] C. H. Chiang and W. A. Sirignano, "Interacting, Convecting, Vaporizing Fuel Droplets with Variable Properties," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 36, No. 4, pp. 875~886, 1993.

[5] G. Patnaik, A Numerical Solution of Droplet Vaporization with Convection, Ph. D Dissertation, Carnegie-Mellon University, 1986.

[6] C. H. Chiang, M. S. Raju and W. A. Sirignano, "Numerical Analysis of Convecting, Vaporizing Fuel Droplet with Variable Properties, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, pp. 1307~1324, 1992.

[7] J. H. Kim and S. H. Park, "A Numerical Study on Combustion of a Liquid Fuel Droplet," Numerical Heat Transfer, Part A-Applications, Vol. 29, pp. 843-858, 1996.

[8] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, New York, 1980.

[9] J. F. Thompson, F. C. Thames and C. W. Mastin, Boundary Fitted Curvilinear Coordinate Systems for Solution of Partial Differential Equations on Fields Containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies, 1977.