

## 연료액적 주변의 비정상 층류 화염장 해석 Numerical Simulation of Transient Laminar Reacting Flows Around Fuel Droplets.

유 승 원<sup>1)</sup>, 강 성 모<sup>2)</sup>, 김 태 준<sup>2)</sup>, 김 용 모<sup>3)</sup>.

S. W. You, S. M. Kang, T. J. Kim and Y. M. Kim

The transient laminar reacting flows around fuel droplet have been numerically analyzed. The physical models used in this study can account for the variable thermophysical properties and the chemistry is represent by the one-step global reaction model. The present study is focused on the vaporization and ignition characteristics, flame structure including wake flame, transition flame and envelope flame, and interaction between droplets. special emphasis is given to the triple flame structure and flame stabilization.

### 1. 서론

연소기 내에서 연소를 일으키기 위한 대표적인 방법으로 연료를 미립화시켜 공기와 혼합하는 방법이 있다. 미립화된 액적의 증발 과정은 연소 반응율이나 연소시간 등에 영향을 준다. 일단 연소가 일어난 후에 액적 주위의 화염구조는 액적의 증발율과 연소 과정을 결정짓는 중요한 요인이 된다.

액적의 증발에 대한 연구는 지난 수십년간 꾸준히 이루어져 왔다[1,2,3]. Prakash, Lara, Tong, Sirignano 등[4,5,6]은 준정적 변화, 일정한 열역학적 물성치 등을 가정하여 액적의 온도변화와 내부유동이 주는 영향을 고려했다. Dwyer 와 Sanders[7,8]는 연료의 증발을 비정상 문제로 해석하였으며 액적 내에 밀도를 평균하여 일정하게 다루었다. Chiang 과 Sirignano[9]는 유동장 내부에서의 액적 내의 움직임과 온도 변화, 액상과 기상의 상

호작용이 가지는 특성을 모사하였다.

연소 특성에 대해서 Gollahlli 와 Brzustowski[10,11]가 낮은 속도에서 높은 속도로 변할때에 나타나는 envelope flame 과 wake flame의 두 종류 다른 화염 구조를 실험적으로 확인하였고 이후 Dwyer 와 Sander[12,13]는 수치적으로 이를 풀어 일반적으로 Reynolds number와 온도가 변함에 따라 wake flame, transition flame, envelope flame의 순서로 변할 것을 예측했다. Jiang[14]는 입구에서 불어오는 공기에 예혼합 가스를 포함하였을 때 나타나는 화염 구조에 대해 연구했고 일정 조건하에서 삼지화염 형태의 구조를 예측하였다.

본 연구에서 우선 연료 액적의 증발 특성을 해석하였고 단일 액적과 두 개의 나란한 액적의 화염 구조의 특성을 다루었다. 기하학적 및 물리적으로 복잡한 영역을 해석하기 위해 비정렬 격자 유한체적법을 적용하였으며 단일 액적에 대하여는 삼지화염 구조를 좀더 분명히 파악하기 위하여 기체 연료를 공기에 예혼합하였다.

1)한양대학교 항공공학과 대학원 (2290-0428)

2)한양대학교 기계공학과 대학원

3)한양대학교 기계공학과

2. 지배방정식과 수치모델

2.1 지배방정식

액적이 유동방향을 따라 분사된 경우 액적 외부의 기체 유동과 액적 내부의 유동이 동시에 일어난다. 수치 모사를 위한 몇 가지 가정을 세운다.

- ① 낮은 마하 수를 가지는 유동에서 소산항은 무시된다.
- ② 액적은 변형이 없이 항상 원형을 유지하며 증발한다.
- ③ 연료와 공기의 혼합기체는 이상기체로 간주된다.
- ④ 기상(Gas phase)과 액상(Liquid phase)의 경계에서는 상평형이 유지된다.

⑤ 액상에서 점성과 잠열을 제외한 열역학적 물성치의 변화는 무시된다.

- ⑥ 체력(Body force)과 부력은 무시된다.
- 본 연구에서는 증발에 관해서는 기체장과 액체장을 모두 고려하였고 연소에 관해서는 습구온도에 도달한 고체 액적을 가정하여 기체장만을 고려하였다.

기상의 지배방정식

연속방정식

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial \tau_{Hg}} + \nabla \cdot (Re_g \rho_g \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

운동량방정식

r-방향 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g V_r}{\partial \tau_{Hg}} + \nabla \cdot (Re_g \rho_g V_r \vec{V}) \\ &= -\nabla \cdot (Re_g p \vec{e}_r) + Re_g \frac{p}{r} + \nabla \cdot (\mu_g \nabla V_r) \\ &+ \nabla \cdot (\mu_g \frac{\partial \vec{V}}{\partial r}) + \nabla \cdot [(-\frac{2}{3} \mu_g)(\nabla \cdot \vec{V}) \vec{e}_r] \\ &- \frac{1}{r} [2\mu_g \frac{V_r}{r} + (-\frac{2}{3} \mu_g)(\nabla \cdot \vec{V})] \end{aligned}$$

(2)

z-방향 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g V_z}{\partial \tau_{Hg}} + \nabla \cdot (Re_g \rho_g V_z \vec{V}) \\ &= -\nabla \cdot (Re_g p \vec{e}_z) + \nabla \cdot (\mu_g \nabla V_z) \\ &+ \nabla \cdot (\mu_g \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}) + \nabla \cdot [(-\frac{2}{3} \mu_g)(\nabla \cdot \vec{V}) \vec{e}_z] \end{aligned} \tag{3}$$

에너지방정식

$$\begin{aligned} & Cp_g \left[ \frac{\partial \rho_g T}{\partial \tau_{Eg}} + \nabla \cdot (Pe_g \rho_g T \vec{V}) \right] \\ &+ \sum_i^N h_i \left[ \frac{\partial \rho_g Y_i}{\partial \tau_{Eg}} + \nabla \cdot (Pe_g \rho_g Y_i \vec{V}) \right] \\ &= \nabla \cdot (k_g \nabla T) \\ &+ \sum_i^N \nabla \cdot [(h_i - h_{N_i}) L_{e_g} \rho_g D_g \nabla Y_i] \\ &+ \frac{a_0^2}{T_\infty * k_{g,\infty}} Q \dot{\omega} \end{aligned} \tag{4}$$

화학종 보존방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_g Y_i}{\partial \tau_i} + \nabla \cdot (Le_g \rho_g Y_i \vec{V}) \\ &= \nabla \cdot (\rho_g D_g \nabla Y_i) + \frac{a_0^2}{\rho_{g,\infty} D_{g,\infty}} \dot{\omega}_i \end{aligned} \tag{5}$$

상태방정식

$$p = \frac{R}{M} (\rho_g T - M) \tag{6}$$

액상의 지배방정식

연속방정식

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial \tau_{Hl}} + \nabla \cdot (Re_l \rho_l \vec{V}) = 0 \tag{7}$$

운동량방정식

r-방향 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_l V_r}{\partial \tau_{Hl}} + \nabla \cdot (Re_l \rho_l V_r \vec{V}) \\ &= -\nabla \cdot (Re_l p \vec{e}_r) + Re_l \frac{p}{r} \\ &+ \nabla \cdot (\mu_l \nabla V_r) - \mu_l \frac{V_r}{r^2} \end{aligned} \tag{8}$$

z-방향 :

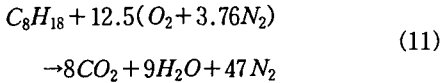
$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_l V_z}{\partial \tau_{Hl}} + \nabla \cdot (Re_l \rho_l V_z \vec{V}) \\ &= -\nabla \cdot (Re_l p \vec{e}_z) + \nabla \cdot (\mu_l \nabla V_z) \end{aligned} \tag{9}$$

에너지방정식

$$\frac{\partial \rho_f C_p T}{\partial \tau_{EI}} + Pe_l \nabla \cdot (\rho_l C_p T \vec{V}) = \nabla \cdot (k_l \nabla T) \quad (10)$$

화학 반응

n-octane과 공기의 global chemistry는 아래와 같이 표현된다.



여기서 화학 반응율( $\dot{\omega}$ )은

$$\dot{\omega} = -3.8 \cdot 10^{11} [(gmol/cm^3)^{1-m-n}/s] \cdot \exp\left(\frac{-15098}{T}\right) \cdot [C_xH_y [gmol/cm^3]]^{0.25} \cdot [O_2 [gmol/cm^3]]^{1.5}$$

where  $x=8, y=18$   
 $m=0.25, n=1.5$  (12)

물리적 경계조건

기상과 액상이 만나는 경계는 증발현상이 일어나는 곳으로 증발현상을 포함하여 운동량의 전달과 열전달이 수반된다.

에너지방정식

$$\frac{k_g'}{k_l'} \frac{\partial T_g}{\partial n} \Big|_s = \frac{\partial T_l}{\partial n} \Big|_s + Pe_l (\rho_g V_{g,n} L) \Big|_s \frac{\rho_{g,\infty}'}{\rho_{l,0}} \quad (13)$$

화학종 보존방정식

$$(D_g \frac{\partial Y_f}{\partial n}) \Big|_{s+} - Re_g Sc_g V_{g,n} (Y_f - 1) \Big|_{s+} = 0 \quad (14)$$

상태방정식

$$\frac{p+R}{R} M_f' = \rho_g T [Y_f (M_{\infty}' - M_f') + M_f'] \quad (15)$$

운동량 평형

$$\mu_g' \left[ \frac{\partial V_{g,\theta}}{\partial n} - \frac{V_{g,\theta}}{n} + \frac{1}{a} \frac{\partial V_{g,n}}{\partial \theta} \right] \Big|_{s+} = \mu_l' \left[ \frac{\partial V_{l,\theta}}{\partial n} - \frac{V_{l,\theta}}{n} + \frac{1}{a} \frac{\partial V_{l,n}}{\partial \theta} \right] \Big|_{s-} \quad (16)$$

상평형

$$G = Y_f - \frac{1}{W_1 + W_2 / f(T_s)} \quad (17)$$

여기서

$$W_1 = 1 - \frac{M_{\infty}'}{M_f'}$$

$$W_2 = \frac{M_{\infty}'}{M_f'} p_{\infty}' (p_g / R + 1), \quad (18)$$

$$f(T_s) = p_v' = \exp(A_1 - A_2 / T_s)$$

## 2.2 수치 모델

단순 증발인 경우 기존의 정렬 격자를 이용한 경우의 계산 결과와 비교하기 위해 셀 중심 비정렬 격자 유한체적법[15]을 사용하였다. 액적의 표면은 밀도와 온도, 속도 및 화학종의 농도 구배가 가장 큰 부분이며 액적 경계를 주위로 2차 이상 오차범위에서 연립 방정식을 구할 때, 액적 경계에서는 정렬 격자의 조건을 만족하는 사각형 격자가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 액적의 주위로 사각형 격자를 기상의 외부와 액적 내부에서는 삼각형 격자를 이용하여 전체적으로는 혼합격자를 사용하였다(Fig. 1). 연소가 일어나는 경우에는 그대로 정렬 격자를 사용하고 있다.

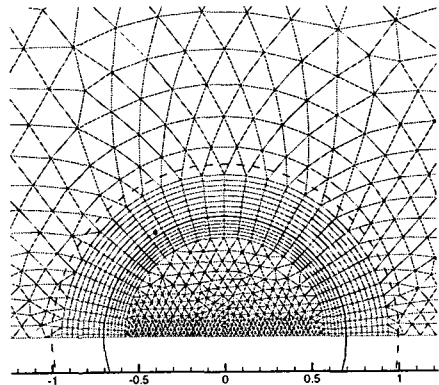


Figure. 1 Regressed droplet grids for gas and liquid fields.

속도와 압력의 연결성을 위해 SIMPLEX 알고리즘을 이용하였다. 대각행렬 좌우로

퍼져 수렴이 힘든 matrix를 다루기 위해 Bi-CGSTAB (Bi-Conjugate Gradient Stabilized)을 적용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발한 수치 모델을 증발이 없는 액적과 증발하는 액적 주변의 비연소 유동장과 증발하는 액적 주변의 화염장의 해석에 적용하였다.

#### 3.1 액적주변의 비연소 유동장

액적 내부와 외부의 상호작용을 고려하여 액적 내부의 유동장과 외부의 유동장을 모두 계산하였다. 액적의 연료로 n-decane을 선택하였고 고온을 유지하는 기체장의 온도는 1000K, 압력은 약 10기압으로 정하였다.

우선 본 연구에서 사용한 수치모델의 예측 능력을 점검하기 위하여 증발이 없는 유동에 대한 항력계수값을 기존의 결과와 비교하였다. Fig. 2는 Reynolds 수에 대하여 항력계수의 변화를 H. A. Dwyer 등의 결과와 비교한 것으로 근접하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

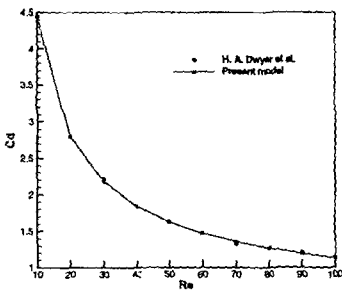


Figure. 2 Drag coefficient of nonevaporating droplet for various Reynolds numbers.

증발이 있는 경우의 유동장을 살펴보기 위하여 무차원 시간( $t \mu'_{g,\infty} / (a_0^2 \rho'_{g,\infty})$ ) 25까지의 계산하였다.

Fig. 3는 시간에 따라 액적 주위의 유동장

의 온도분포를 나타낸다. 액적의 후류 부분에서 등온선이 액적 쪽으로 조금 당겨진 모양을 하고 있다가 (b)와 (c)에서는 점차로 유동방향으로 옮겨지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 액적이 분사된 초기에 액적뒤에 존재하던 와류가 시간이 지나면서 점점 작아지다 소멸하기 때문이다.

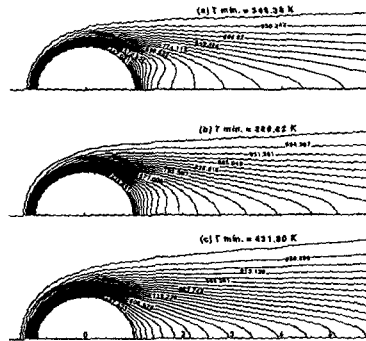


Figure. 3 Temperature contours in gas phase (a) Time= 1, (b) Time= 3, (c) Time= 12

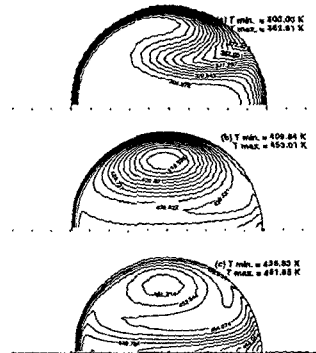


Figure. 4 Temperature contours in liquid phase (a) Time= 1, (b) Time= 12, (c) Time= 25

Fig. 4는 액적 내부의 온도장의 변화를 나타낸다. 액적 내부유동을 고려할 때 내부에서 생기는 와류의 영향으로 열전달은 같은 조건의 고체 구형의 물체보다 더 빠르게 일어난다. 이 경우 와류의 중심을 기준으로 쓰

거운 유체가 회전하며 액적의 온도를 높인다. 따라서 액적의 최소온도는 액적의 중심이 아니라 액적내부에서 일어나는 와류의 중심이 되고 결과적으로 와류가 일어나지 않는 경우에 비하여 액적의 최소온도의 위치가 액적표면과 더 가까이 있게 되므로 온도의 구배가 커지게 되고 열유속도 커지게 된다.

### 3.2 액적주변의 연소 유동장

비연소 유동장 해석의 경우 액적 외부의 유동장 뿐 아니라 액적 내부의 유동장까지 고려하였다. 그에 비해 연소 유동장 해석의 경우에는 유동시간에 비해서 화학반응시간이 매우 작기 때문에 액적 외부의 유동만을 고려해도 무리가 없다. 이때 액적은 습구온도에 도달한 solid 구와 같다고 가정하였다. 이때 경계조건은 다음과 같다.

$$\rho_g v_{g,n} = \rho_g v_{g,n} Y_f - \rho_g D_g \left( \frac{dY_f}{dr_f} \right)_s \quad (19)$$

$$\rho_g v_{g,n} Y_O = \rho_g D_g \left( \frac{dY_O}{dr_f} \right)_s \quad (20)$$

$$\rho_g v_{g,n} L = k_g \left( \frac{dT}{dr_f} \right)_s \quad (21)$$

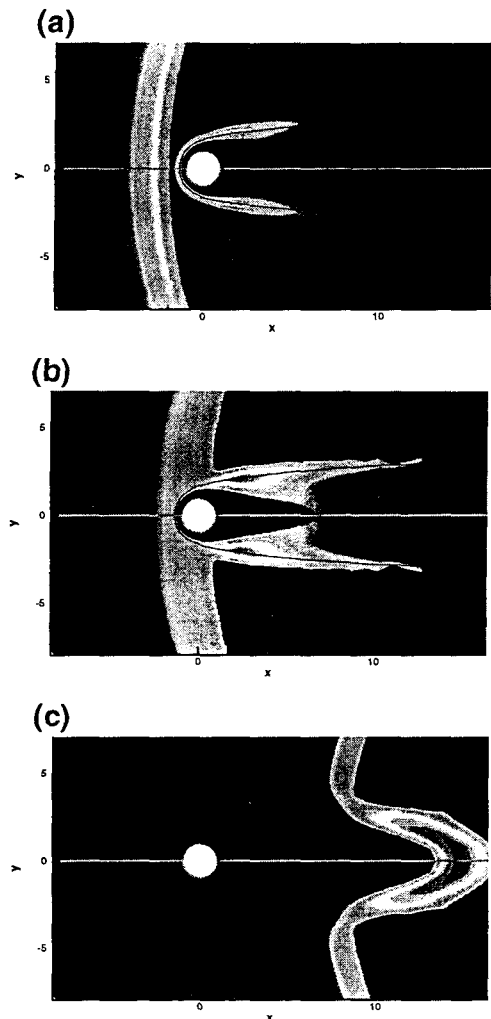
$$(v_{g,\theta})_s = 0 \quad (22)$$

$$\ln \left( \frac{p_{g,s}}{p_{ref}} \right) = \frac{L}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{g,s}} \right) \quad (23)$$

단일 액적의 연소 현상을 해석하기 위해 연료로 n-octane을 사용하여 Reynolds number 30인 경우 온도가 1150K에서 1250까지 변화 할 때의 화염구조를 살펴보았다. 일반적으로 단일 액적의 연소를 생각할 때 Reynolds 가 낮을 수록, 주위의 온도가 높을 수록 wake flame에서 envelope flame으로 변화한다. 본 연구에서는 화염구조의 특징을 좀더 확실히 살펴보기 위하여 입구에서 유동방향으로 equivalence ratio 0.3 정도의 연료를 공기와 함께 불어주었다.

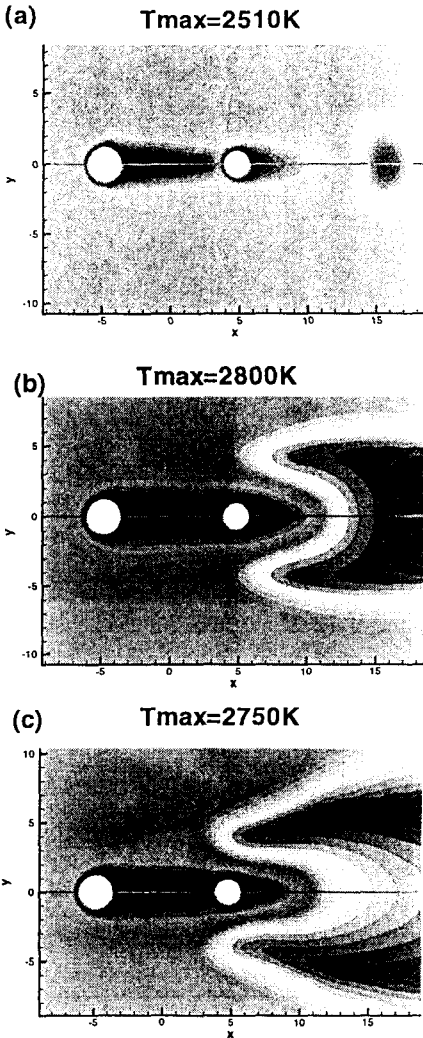
Fig. 5는 주변온도를 변화시킴에 따라 변하는 reaction rate를 정상상태에 도달했을

때에 나타낸 것이다. 주위 온도가 낮아짐에 따라 envelope flame(Fig. 5a)에서 transition flame(Fig. 5b)으로 다시 wake flame(Fig. 5c)으로 진행된다. 특히 transition flame(Fig. 5b)의 경우 상당히 좁은 온도 범위에서 나타났고 stoichiometric line을 따르는 diffusion flame과 fuel rich 영역과 fuel lean 영역의 화염을 가지는 삼지화염 형태를 나타냈다



(a)  $T_{inf} = 1230K$  (b)  $T_{inf} = 1215K$   
(c)  $T_{inf} = 1170K$

Fig. 5 Reaction rate contours

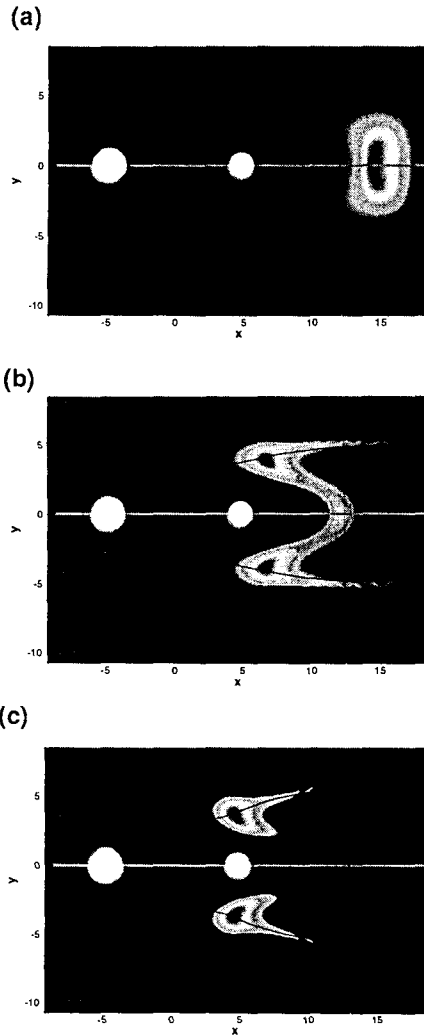


(a)  $t=2.5$  (b)  $t=4.25$  (c)  $t=9.5$

**Fig. 6** Temperature contours  
at  $Re=10$ ,  $T_{inf}=1315K$

증발액적 간의 상호 작용이 화염구조에 미치는 영향을 해석하기 위해서 두 개의 액적을 평행하게 나열하여 화염장을 형성하였다. 두 액적의 간격이 적당한 경우 선두 액적에서 증발된 연료는 후미 액적에 영향을 주어 마치 예혼합 연료를 전방에서 불어준 것과 같은 효과를 나타내게 되고 조건에 따라서 wake flame, transition flame, envelope flame의 구조를 나타낸다. 본 연구에서 액적

상호 간의 거리는 후미 액적의 지름의 약 4 배 정도로 하였다. 특히 후미 액적의 입장에서 더 많은 예혼합된 효과를 얻을 수 있도록 하기 위해서 선두 액적의 반지름을 후미 액적의 반지름의 1.3배로 하였다. Reynolds number 10과 주위온도 1315K일 때의 비정상 연소 특성을 해석하였다.



(a)  $t=2.5$  (b)  $t=4.25$  (c)  $t=9.5$

**Fig. 7** Reaction rate contours  
at  $Re=10$ ,  $T_{inf}=1315K$

비정상 상태 화염 유동장의 특성을 알아보

기 위해 시간변화에 따른 온도장의 변화 (Fig. 6)와 reaction rate의 변화(Fig. 7)를 살펴 보았다. 초기에 후미 액적의 후방에서 서서히 반응이 시작하여 어느 정도 온도에 도달하면 reaction rate의 exponential term의 영향으로 급격히 반응율이 증가하고 이에 따라 온도 역시 빠르게 증가한다. 일단 연소가 시작되면 반응에 필요한 산소 역시 빠른 속도로 소모되므로 더 이상의 급격한 증가는 나타나지 않고 조금씩 정상 상태로 다가간다. Fig. 7에서 stoichiometric line따라 나타나는 reaction rate의 특성을 살펴 보았다. 초기 wake flame 형태에서 반응이 진행됨에 따라 diffusion flame 과 fuel rich 영역의 화염이 나타났고 차차 정상 상태에 도달 하면서 stoichiometric line을 기준으로 fuel rich 영역의 화염은 점차 줄어들고 fuel lean 영역으로의 화염이 생김을 확인하였다. 또한 단일액적에서와 마찬가지로 상호 작용하는 두 개의 액적의 경우도 좁은 범위에서 안정된 transition flame을 형성함을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온의 기체장에 분사된 액적들의 증발 및 연소 수치적으로 해석하였다.

본 연구에서 개발한 수치모델은 다상 층류 연소 유동장의 특성을 잘 예측하였으며 기하학적 및 물리적으로 복잡한 영역을 가지는 비정상 액적연소장의 해석을 위하여 비정렬 혼합격자를 사용하였다.

단일 액적과 두 개의 연속된 액적의 연소의 경우 일정한 범위의 주위 온도에서 삼지 화염의 형태를 확인하였다. 추후 온도 이외의 열역학적 상태량의 변화에 따른 연소 특성의 변화에 대한 연구를 수행해 나갈 예정이다. 또 복잡한 액적 배열이나 비구형 액적 변형등의 영향을 고려하기 위해 비정렬격자

유동해법을 적용할 계획이다.

#### 참고문헌

- [1] C. K. Law, 1982, "Recent advances in droplet vaporization and combustion," Prog. Energy Combust. Sci. 8, 171.
- [2] G. M. Faeth, 1983, "Evaporation and combustion of sprays," Prog. Energy Combust. Sci. 9, 1.
- [3] W. A. Sirignano, 1983, "Fuel droplet vaporization and spray combustion theory," Prog. Energy Combust. Sci. 9, 291.
- [4] S. Prakash, W. A. Sirignano, 1980, "Theory of Convective Droplet Vaporization with Unsteady Heat Transfer in the Circulating Liquid Phase," International Journal of Heat and Mass Transfer. 23, pp.253-268.
- [5] P. Lara, W. A. Sirignano, 1981, "Theory of Transient Multicomponent Droplet Vaporization in a Convective Field," Proceeding of Eighteenth Symposium on Combustion, pp. 1365-1374.
- [6] A. Y. Tong, W. A. Sirignano, 1982, "Analytical Solution for Diffusion and Circulation in a Vaporizing Droplet", Proceeding of Nineteenth Symposium on Combustion, Combustion Institute, pp. 1007-1020.
- [7] H. A. Dwyer, B. R. Sanders, 1984, ASME Paper 84-WA/HT-20.
- [8] H. A. Dwyer, B. R. Sanders, 1984, "Detailed computation of unsteady droplet



- dynamics," 20th Symp. Combust(int.),  
The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.  
1743-1749.
- [9] C. H. Chiang, M. S. Raju, W. A.  
Sirignano, 1989, "Numerical Analysis of  
Convecting, Vaporizing Fuel Droplet with  
Variable Properties," AIAA-89-0834.
- [10] Gollahalli, S. R., and Brzustowski, T.  
A., Fourteenth Symposium (International)  
on Combustion, The Combustion  
Institute, Pittsburgh, 1973, pp. 1333-1344
- [11] Gollahalli, S. R., and Brzustowski, T.  
A., Fifteenth Symposium (International)  
on Combustion, The Combustion  
Institute, Pittsburgh, 1975, pp. 409-417
- [12] Dwyer, H. A., and Sanders, B. R.,  
Twenty-First Symposium (International)  
on Combustion, The Combustion  
Institute, Pittsburgh, 1986, pp. 664-639
- [13] Dwyer, H. A., and Sanders, B. R.,  
Twenty-Second Symposium  
(International) on Combustion, The  
Combustion Institute, Pittsburgh, 1988,  
pp. 1924-1929
- [14] T.L. JIANG, W. S. CHEN, M. J.  
TSAI and H. H. CHIU, 1994 "Double  
Flame and Multiple Solution  
Computations for a Wetted Porous  
Sphere Vaporizing in Reactive Flows."  
Combust. Sci and Tech. ,vol. 102, pp.  
115-143
- [15] Y. M. Kim, " Unstructured-Grid  
Finite-Volume Method for Analysing  
Incompressible Flows", KSME Spring  
Annual Meeting, 1999, pp. 128-140