

# 연소 유동장 내 액체 연료 액적간의 상호작용에 대한 수치적 연구

조종표\* · 김호영\*\* · 박심수\*\*

## Numerical Study on the Interaction of Liquid Fuel Droplets in the Reacting Flow Field

Chong Pyo Cho, Ho Young Kim, and Simsoo Park

**Key Words:** droplet interaction, vaporization, envelope flame, wake flame

### Abstract

The objective of this work is to elucidate the details of two key factors dominating the droplet burning behavior in sprays : droplet-droplet interaction and convective flow. The combustion of a one-dimensional linear droplet array with a convective flow has been studied. A one-step, second order model was employed to simulate the chemical reaction in the combustion process. Results for droplet arrays burning at two Reynolds numbers, 50 and 100, two horizontal droplet spacings, 5 and 11 radii, and two vertical droplet spacing, 2 and 4 radii, were obtained. The results indicate the droplet burning behavior is affected by Reynolds number, droplet-droplet spacing, and the relative location of droplets in the array. Droplet-droplet interaction was found to be strong for arrays with smaller droplet spacing.

#### 기호설명

$A_r$  arrhenius coefficient  
 $C_p$  specific heat at constant pressure  
 $Nu$  Nusselt number  
 $r$  droplet radius  
 $R_u$  universal gas constant  
 $m_d$  mass of droplet  
 $W$  molecular weight  
 $Y$  mass fraction  
 $\lambda$  thermal conductivity

#### 하첨자

$f$  fuel  
 $g$  gas phase  
 $l$  liquid phase  
 $s$  droplet surface  
 $\infty$  ambient  
 $0$  initial state

### 1. 서론

액체 연료의 연소는 일반적으로 가스상의 연소 환경 속으로 액체 연료를 분사함으로써 이루어진다. 분사된 액체 연료는 조밀한 액적군으로 나뉘지는 미립

\* 고려대학교 기계공학과 대학원

\*\* 고려대학교 기계공학과

화 과정을 거쳐 연소실로 침투하게 된다. 액체 연료의 분사연소현상을 이해하기 위해서는 분사액적군을 구성하는 개개 액적의 증발 및 연소 특성을 이해하는 것이 바람직하다. 정지된 공간 내의 단일액적의 증발율은  $d^2$ 법칙으로 대표된다. 그러나 실제 연소 과정에서 액적간의 상호작용은 전체적인 연소 특성에 영향을 주는 중요한 요소 중의 하나이다.

Tsai와 Sterling[1]은 유동 방향에 종렬로 배열된 3개의 액적에 대해 액적간의 거리와 유동의 유입 속도의 변화에 따른 화염 구조의 차이 및 액적 주위의 국부적인 Nusselt 수에 초점을 맞춰 비교하였다. 액적간의 거리가 감소함에 따라 액적 상호작용이 증가함을 보였다.

Dwyer와 Sanders[2]는 비정상 상태에서 온도가 균일하다고 가정한 단일액적의 lifetime의 말기 근처에서 Reynolds 수에 따른 열전달 및 질량전달을 수치적으로 해석하였다.

Abramzon와 Sirignano[3]는 내부 순환 유동을 갖는 움직이는 단일연료액적에 대해 가변적인 열역학적 물성치, non-unit Lewis수, Stefan 유동, 그리고 액적 내부의 가열을 고려하여 동적 거동과 증발현상을 수치적으로 해석하였다.

본 연구에서는 고온 고압의 공기 중에 순간적으로 방출된 옥탄(octane) 액적들을 대상으로 다양한 조건 하에서 액적간의 상호작용이 화염의 구조 및 액적들의 증발율 등에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1. 지배방정식

Fig. 1과 같이 고정된 두 개의 액적을

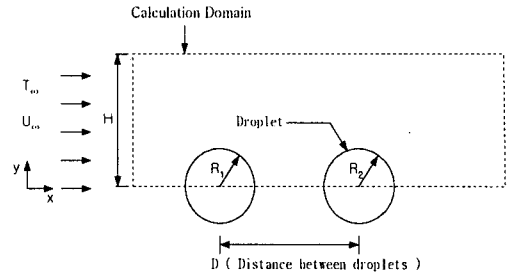


Fig. 1 Computational domain

대상으로 연소현상을 해석한다.

기체상에 대한 지배방정식 및 상태 방정식은 식(2-1)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\phi) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi + S_{\ell\phi} \end{aligned} \quad (2-1)$$

위 식에서  $\phi$ 는 해석하고자 하는 종속 변수로서 각 방향의 속도성분( $u, v$ ), 엔탈피( $h$ ) 및 각 화학종의 질량분율( $Y_i$ )을 나타낸다.  $S_\phi$ 는 기체상의 생성항,  $S_{\ell\phi}$ 는 액체상의 생성항, 그리고  $\Gamma_\phi$ 는 확산 계수를 나타낸다. 상태방정식은 다음과 같다.

$$p = \rho R_u T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{W_i} \quad (2-2)$$

### 2.2 초기 및 경계조건

기체상은 일반적인 가스터빈 연소기 내부의 온도와 압력인  $T_\infty = 1250 \text{ K}$ ,  $p = 10$ 기압으로 가정하였고, 액적의 온도는 끓는점 온도로 일정하다고 가정하였다. 계산에 사용된 상태량들은 table 1[3,5,8]에 정리하였다. 액적 표면에서 연료의 질량분율,  $Y_f$ 는 1로 가정하였으며, 계산 영역으로 유입되는 공기는 균일한 속도를 갖는다고 가정하였다. 계산영역의 아

래면(y=0)뿐만 아니라 윗면(y=H)도 대칭 조건으로 놓으므로써 또 다른 액적에 의한 액적 중심간의 수직거리(y=2H) 변화에 따른 영향을 계산하였다.

### 2.3 액적 표면 경계조건

액적 표면에서의 에너지 수지(energy balance)는 다음과 같다.

$$m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = h A_i (T_\infty - T_i) + \frac{dm_i}{dt} Q_i \quad (2-6)$$

위식에서 h는 대류열전달 계수이다. 액적 내부의 온도는 변화가 없기 때문에 위식은 다음과 같이 된다.

$$-\frac{dm_i}{dt} Q_i = h A_i (T_\infty - T_i) \quad (2-7)$$

위 식에서  $Q_i$ 은 증발잠열이며 일정하다고 가정하였다.

### 2.4 액적 증발에 의한 반경 변화

식(2-7)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$-\frac{dr_i}{dt} = \frac{\lambda_\infty Nu}{2 r_i \rho_i Q_i} (T_\infty - T_i) \quad (2-8)$$

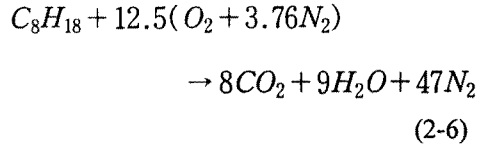
Ranz 와 Marshall[6,7]의 correlation이용하면 식(2-8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-\frac{dr_i}{dt} = \frac{\lambda_\infty}{r_i \rho_i Q_i} \times (1 + 0.23 Re_s^{0.5} Pr^{0.33}) (T_\infty - T_i) \quad (2-9)$$

위의 식으로부터 액적의 반경 변화를 계산하여 격자를 시간 단계마다 수정하였다.

### 2.5 화학반응

연료와 공기의 이상적인 반응으로 가정하면 아래와 같이 쓸 수 있다.



1단계 2차 Arrhenius 반응 모델[2,9]을 사용하여 반응률을 계산하였다.

$$\dot{\omega}_n = -A_r \rho_g^{a+b} \frac{Y_f^a Y_o^b}{W_f^a W_o^b} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } A_r &= 4.6 \times 10^{14} \\ a &= 0.25 \\ b &= 1.5 \\ E_a &= 125604 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

### 2.6 수치 해석

Poission계 방정식을 이용한 타원형 격자생성법을 이용하여 액적의 표면에서는 5° 간격으로 격자점을 구성하고 전체 계산 영역에서는 211×41의 비균일 격자계를 구성하였다.

운동량 방정식은 Karki[4]의 해법을 응용하여 implicit방법으로 풀었으며 엇갈린 격자계(staggered grid)를 이용하였다. 압력수정방정식은 SIMPLEC해법을 적용하였다. 생성된 격자계는 Fig. 2와 같다.

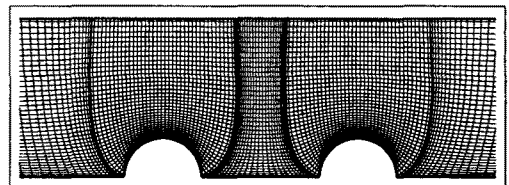


Fig. 2 Grid configuration

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 온도분포의 변화

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 액적간의 거리(D)가  $11R_0$ , 수직거리(H)가  $4R_0$ , 그리고 Re 수가 50일 때 시간에 따른 화염의 발달 과정과 연료질량분율의 분포를 나타내고 있다. 두 액적 모두 액적의 뒷부분에서 반응이 시작되어 점차 액적 주위를 감싸는 화염, 즉 envelope 화염을 형성한다. 이후 두 번째 액적은 첫 번째 액적의 미연 연료성분의 영향(Fig. 4)으로 인해 화염영역이 뒤로 밀려난다. 두 액적 사이에 축적된 미연연료성분으로 인해 두 번째 액적은 상대적으로 평균 표면온도(Fig.9)가 낮고 증발율(Fig. 8)도 낮다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 Re 수가 100인 경우 시간에 따른 화염발달과정과 연료질량분율의 분포를 나타내고 있다. 공기와의 상대속도가 크기 때문에 두 액적

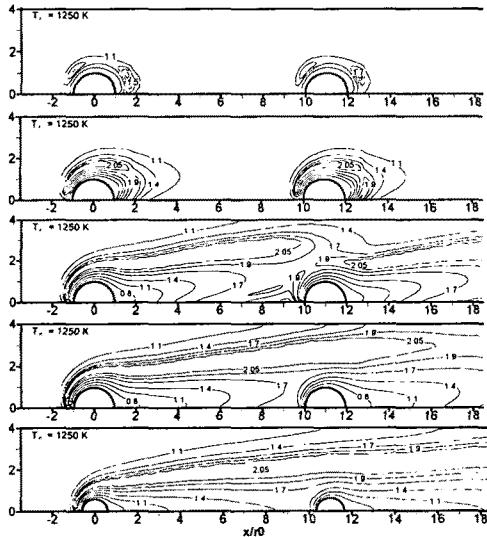


Fig. 3 Temperature contours at 0.1, 0.2, 0.7, 1, 9 msec for  $Re=50$ ,  $D=11R_0$ , and  $H=4R_0$

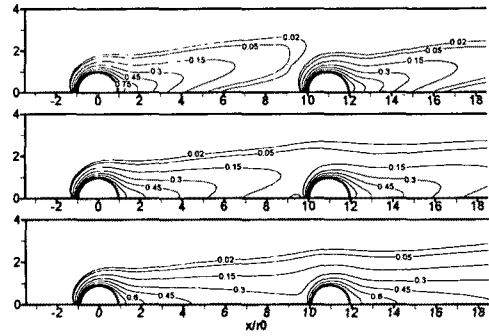


Fig. 4 Fuel mass fraction contours at 0.35, 0.7, and 1 msec for  $Re=50$ ,  $D=11R_0$ , and  $H=4R_0$

모두 화염이 앞으로 전파되지 못하고 액적의 뒷부분에 머물게 되는 wake 화염을 형성한다. 이후 Re 수가 50인 경우와 마찬가지로 두 번째 액적의 화염은 첫 번째 액적의 미연 연료성분의 영향을 받아 뒤로 밀려난다. 두 액적 사이에 미연 연료성분이 축적(Fig. 6)되지만 선두 액적 뒷부분에 형성된 wake 화염의 영향으로 두 번째 액적 주위의 온도가 높게 유지된다(Fig. 9).

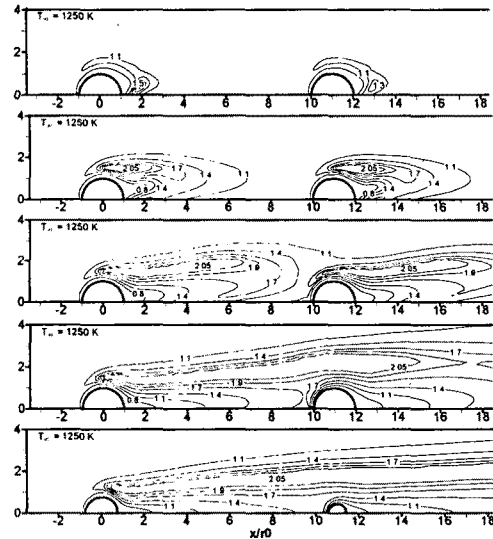


Fig. 5 Temperature contours at 0.1, 0.2, 0.35, 0.7, and 9 msec for  $Re=100$ ,  $D=11R_0$ , and  $H=4R_0$

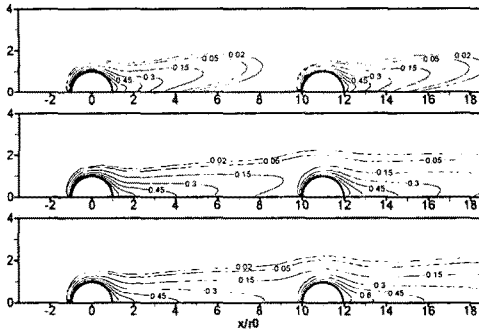


Fig. 6 Fuel mass fraction contours at 0.35, 0.7 and 1 msec for  $Re=100$ ,  $D=11R_0$ , and  $H=4R_0$

Fig. 7, Fig. 8 그리고 Fig. 9는 각각 두 경우에 대한 시간에 따른  $d^2$ 의 변화, 증발율의 변화, 그리고 액적의 평균표면온도의 변화를 나타내고 있다.  $Re$  수가 50인 경우 초기에 두 번째 액적의 증발율과 평균표면온도가 급격히 감소하는 것은 첫 번째 액적의 미연 연료성분의 영향 때문이다.

$Re$  수가 100인 경우 두 번째 액적은 첫 번째 액적의 wake 화염의 영향으로 평균표면온도가 높고, 공기와의 더 큰 상대속도 때문에 증발율이 상당히 높다.

첫 번째 액적은 wake 화염으로부터 거의 영향을 받지 않기 때문에 평균표면온도가 상대적으로 낮게 유지되면서 증발율을 또한 크지 않다. Fig. 9에서 두  $Re$  수

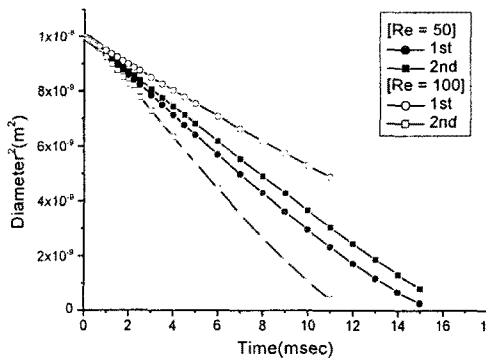


Fig. 7 Diameter squared vs time :  $D=11R_0$ ,  $H=4R_0$

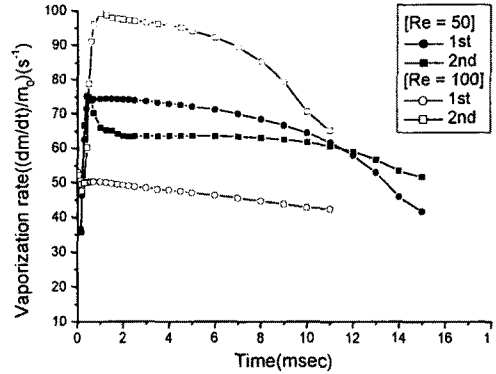


Fig. 8 Vaporization rate vs time :  $D=11R_0$ ,  $H=4R_0$

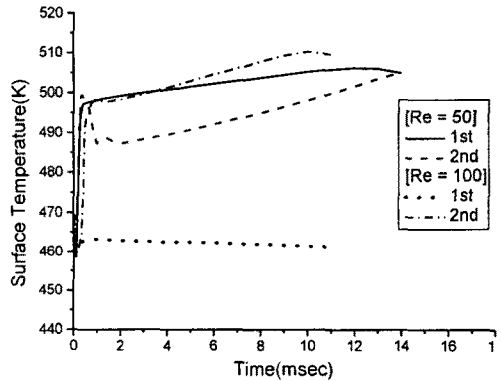


Fig. 9 Surface temperature vs time :  $D=11R_0$ ,  $H=4R_0$

모두 두 번째 액적의 평균표면온도가 초기에 급격히 하락한 이후 계속해서 상승하는 것은 두 액적의 증발율 차이로 인해 두 액적의 직경비가 변화하기 때문이다.

### 3.2. 액적간 수평거리(D) 변화의 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 액적간의 수평거리가  $5R_0$ ,  $Re$  수가 50일 때 시간에 따른 화염발달 과정 및 연료질량분율의 분포를 나타낸다. 화염의 발달 과정은 수평거리가  $11R_0$ 일 때(Fig.3)와 유사하지만, 두 액적사이에 첫 번째 액적의 미연 연료성분이 상당히 축적되는 것을 알 수 있다. 이러한 미연연료성분은 상대적으로

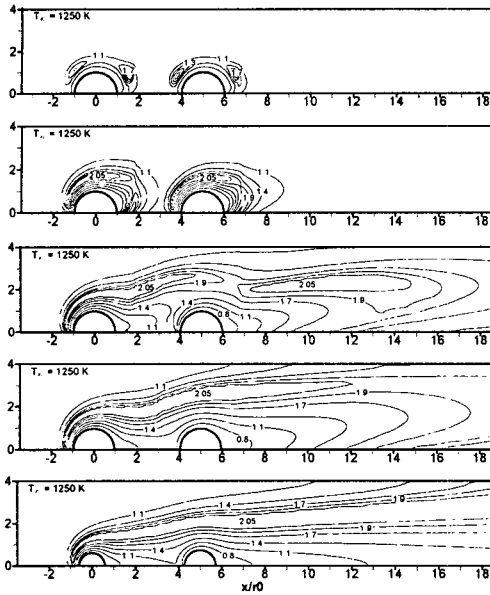


Fig. 10 Temperature contours at 0.1, 0.2, 0.7, 1, and 9 msec for  $Re=50$ ,  $D=5R_0$ , and  $H=4R_0$

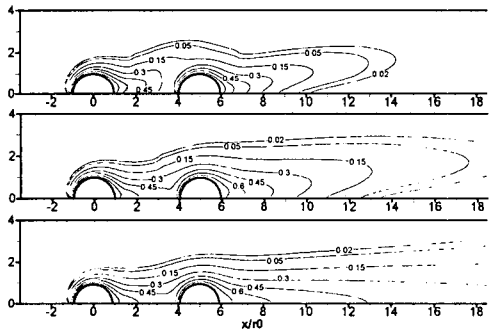


Fig. 11 Fuel mass fraction contours at 0.35, 0.7, and 1 msec for  $Re=50$ ,  $D=5R_0$ , and  $H=4R_0$

로 온도가 낮기 때문에 이것의 영향을 받는 두 번째 액적의 평균표면온도는 낮아진다(Fig. 16). 따라서 증발율(Fig. 15) 및  $d^2$ 의 변화(Fig. 14)도 작다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각  $Re$  수가 100 일 때 시간에 따른 화염의 발달과정과 연료질량분율의 분포를 나타낸다. 수평거리가  $11R_0$ 인 경우와 달리 두 번째 액적은 초기에 envelope 화염을 형성하면서

평균표면온도가 급격히 상승하고 증발율도 급격히 상승한다. 이후 첫 번째 액적의 영향으로 화염이 뒤로 밀려나고, 동시에 미연연료성분의 축적으로 인해 평균표면온도와 증발율이 다소 감소한다.

그러나 첫 번째 액적의 뒷부분에 형성된 wake 화염의 영향으로 두 번째 액적의 증발율은 높다.

화염이 안정화된 이후 수평거리가  $11R_0$ 인 경우와 같이 두  $Re$  수에 대하여

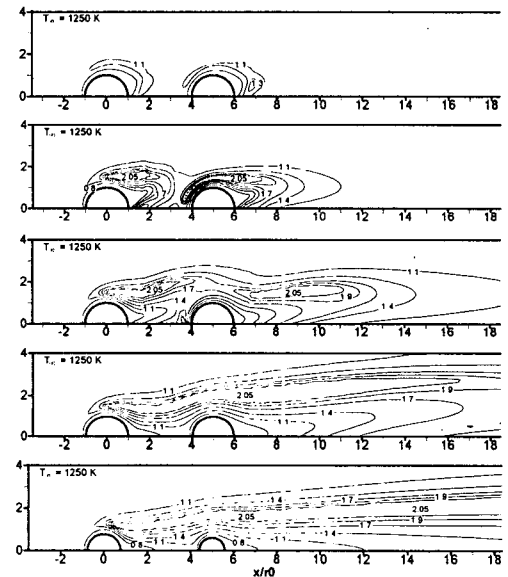


Fig. 12 Temperature contours at 0.1, 0.2, 0.35, 0.7, and 9 msec for  $Re=100$ ,  $D=5R_0$ , and  $H=4R_0$

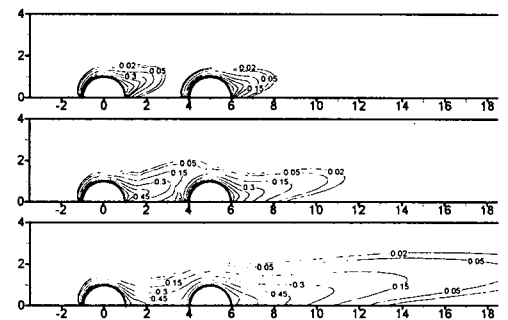


Fig. 13 Fuel mass fraction contours at 0.2, 0.35, and 0.7 msec for  $Re=100$ ,  $D=5R_0$ , and  $H=4R_0$

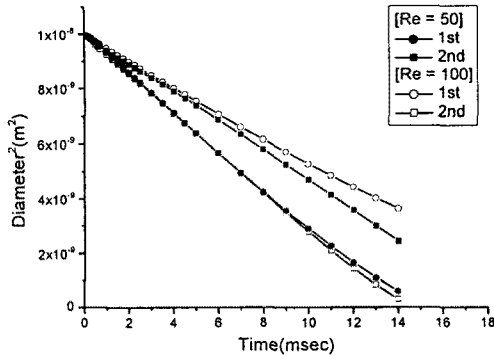


Fig. 14 Diameter squared vs time :  
 $D=5R_0$ ,  $H=4R_0$

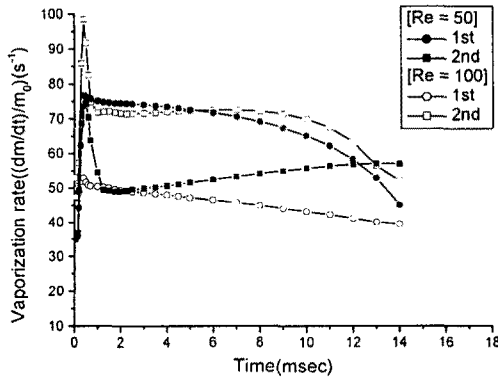


Fig. 15 Vaporization rate vs time :  
 $D=5R_0$ ,  $H=4R_0$

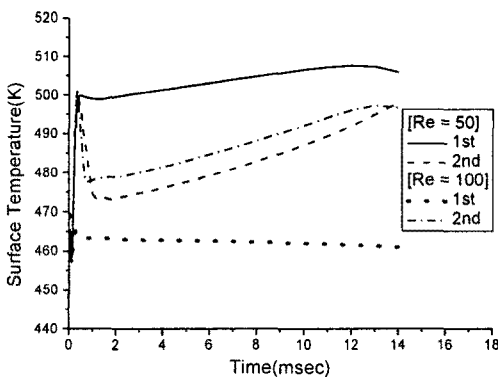


Fig. 16 Surface Temperature vs time :  
 $D=5R_0$ ,  $H=4R_0$

두 번째 액적의 평균표면온도(Fig. 16)가 상승하게 되는 이유는 두 액적의 직경비가 변화하기 때문이다.

### 3.3. 액적간 수직거리(H) 변화의 영향

계산 영역의 상부( $y=H$ )를 대칭조건으로 놓으므로써  $y=2H$ 인 곳에 존재하는 또 다른 두 액적과의 수직거리 변화에 따른 영향을 조사하였다. Fig. 16과 Fig. 17은 각각 Re 수가 50인 경우의 시간에 따른 화염의 발달과정과 연료질량분율의 분포를 나타낸다. 화염의 형태(Fig. 16)는 envelop 화염과 유사하게 첫 번째 액적의 앞부분에 위치하지만 화염이 뒤쪽으로 전파되지 못한다. 두 액적사이에 농도가 짙은 미연연료성분이 넓게 존재한다. 이러한 이유로 두 액적 모두 평균 표면 온도(Fig. 22)가 상대적으로 낮다.

Fig. 18과 Fig. 19는 Re 수가 100일 때 시간에 따른 화염의 발달과정과 연료질

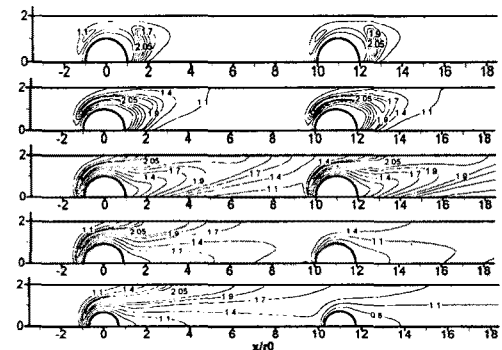


Fig. 16 Temperature contours at 0.2, 0.35, 0.7, and 2.5, and 12 msec for Re=50,  $D=11R_0$ , and  $H=2R_0$

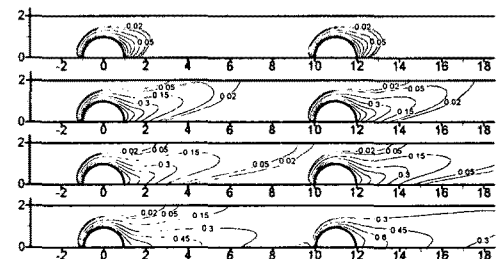


Fig. 17 Fuel mass fraction contours at 0.35, 0.7, 1, and 2.5 msec for Re=50,  $D=11R_0$ , and  $H=2R_0$

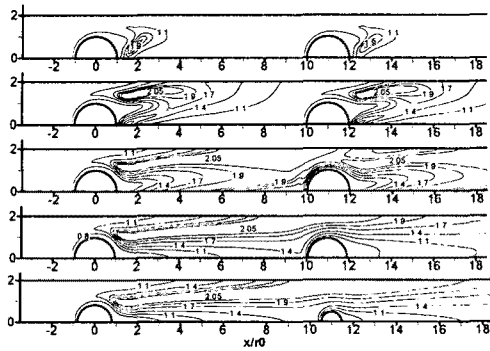


Fig. 18 Temperature contours at 0.2, 0.35, 0.7, 2.5, and 12 msec for  $Re=100$ ,  $D=11R_0$ , and  $H=2R_0$

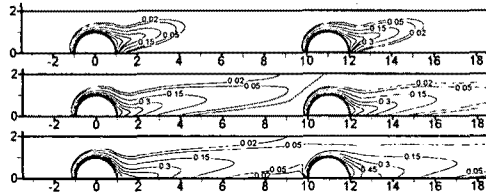


Fig. 19 Fuel mass fraction contours at 0.35, 0.7, and 1 msec for  $Re=100$ ,  $D=11R_0$ , and  $H=2R_0$

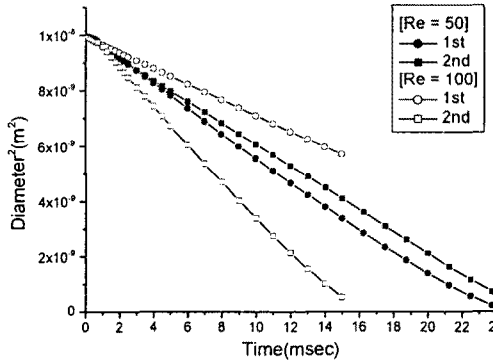


Fig. 20 Diameter squared vs time :  $D=11R_0$ ,  $H=2R_0$

량분율의 분포를 나타낸다. 첫 번째 액적의 wake 화염이 좀더 뒤쪽에 위치하기 때문에 첫 번째 액적에는 거의 영향을 주지 않는다. 따라서 액적의 평균표면온도는 상당히 낮다(Fig. 22). wake 화염의 영향을 받은 두 번째 액적의 평균 표면

온도 및 증발율은 상대적으로 높다(Fig. 21, Fig. 22)

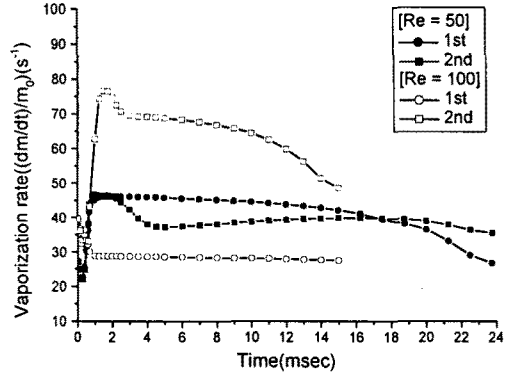


Fig. 21 Vaporization vs time :  $D=11R_0$ ,  $H=2R_0$

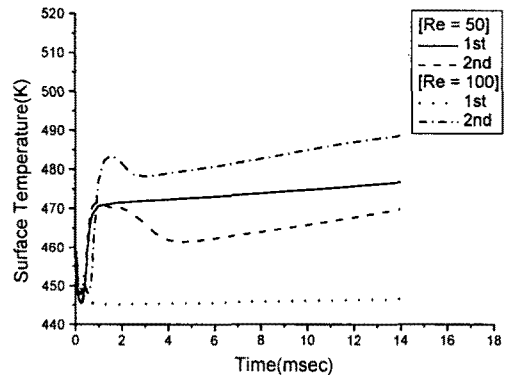


Fig. 22 Surface temperature vs time :  $D=11R_0$ ,  $H=2R_0$

#### 4. 결론

고온 고압의 연소실에 분사된 연료 액적간의 상호작용을 여러가지 조건 하에서 수치적으로 계산하였다.

액적간의 거리가 길고 저  $Re$  수의 경우, 두 액적은 초기에 envelope 화염을 형성하면서 단일액적의 연소현상과 유사하게 진행되지만 이후 첫 번째 액적의 미연 연료성분의 영향을 받은 두 번째 액적은 다소 증발율이 감소한다.

고  $Re$  수의 경우 첫 번째 액적 뒷부분



에 형성된 wake 화염으로 인해 첫 번째 액적은 증발율이 낮지만 두 번째 액적은 증발율이 상당히 증가한다.

액적간의 거리가 짧은 경우, 저 Re 수에서 두 액적사이에 과다하게 축적되는 미연 연료성분의 영향으로 두 번째 액적의 증발율은 크게 감소한다. 고 Re 수에서 wake 화염에도 불구하고 미연 연료성분의 영향으로 두 번째 액적의 증발율은 크지 않다.

액적간의 수직거리가 짧은 경우, 저 Re 수에서 두 액적 모두 평균 표면 온도 및 증발율이 상대적으로 낮다. 고 Re 수에서 두 번째 액적은 wake 화염의 영향으로 증발율이 크지만 첫 번째 액적은 좀 더 뒤로 밀려난 wake 화염으로 인해 증발율이 제일 낮다.

## 후기

본 연구는 고려대학교 2000년도 특별 연구비에 의하여 수행된 것입니다. 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Tsai, J. S., Arthur M. Sterling, "The Combustion of Linear Droplet Arrays", 23th Symposium(Int.) on combustion, The Combustion Institute, pp. 1405-1411, 1990.
- (2) Harry A. Dwyer, Billy R. Sanders, "Calculations of Unsteady Reacting Droplet Flows", 22th Symposium(Int.) on combustion, The Combustion Institute, pp. 1923-1929, 1988.
- (3) Abramzon, A., Sirignano, W. A., "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculation",

International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 9, pp. 1605-1618, 1989.

- (4) Karki, K.C. and Patankar, S.V., "Solution of Some Two-Dimensional Incompressible Flow Problems using a Curvilinear Coordinate System Based Calculation Procedure", Numerical Heat Transfer, Vol. 14, pp. 309-321, 1988.
- (5) Frank Kreith, P. E., "Fluid Flow Data Book", Genium Publishing Corporation, 1984.
- (6) 김호영, "연소이론", 아카넷, pp. 327-358, 2000.
- (7) Kuo, Kenneth K., "Principles of Combustion", John Wiley and Sons, 1986.
- (8) Turns, S. R. "An Introduction to Combustion", McGraw-Hill, Singapore, 2000.
- (9) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", Combustion Science and Technology, Vol. 27, pp. 31-43, 1981.

Table 1

Physical and thermodynamic properties

Density, fuel [kg/m <sup>3</sup> ]	696
Specific heat, fuel [J/kg · K]	2103.86
Initial droplet temperature [K]	420
Latent heat [J/kg]	300000
Viscosity, fuel [kg/m · s]	$2.227 \times 10^{-3}$
Density, air [kg/m <sup>3</sup> ]	2.827
Specific heat, air [J/kg · K]	1165.4
Viscosity, air [kg/m · s]	$4.752 \times 10^{-3}$
Prandtl Number	0.7
Initial Droplet Diameter [ $\mu$ m]	100