

액체 연료 액적들의 배열이 증발 및 연소특성에 미치는 영향

조종표* · 김호영**

The Effects of Droplet Arrangement on the Vaporization and Combustion Characteristics of Liquid Fuel Droplets

Chong Pyo Cho and Ho Young Kim

ABSTRACT

The objective of present study is to understand the interaction of burning droplets in air stream for various droplet arrangement. The unsteady combustion of linearly arranged droplets with a convective flow has been studied numerically. The droplets with spacing of $5R_0$ to $40R_0$ horizontally and with spacing of $4R_0$ to $16R_0$ vertically are studied.

The effects of Reynolds number, horizontal spacing, and vertical spacing on the interaction of burning droplets are examined. The results indicate that the droplet burning behavior is influenced by Reynolds number and relative location of droplets in the array. The interaction of droplets is increased for arrays with smaller droplet spacing. The vaporization of droplets in the array is varied with both horizontal and vertical spacing exponentially.

Key Words : Interaction of droplets, Burning droplets, Droplet spacing

기 호 설 명

A_r	arrhenius coefficient		하첨자
C_p	specific heat at constant pressure	g	gas phase
h	static enthalpy	l	liquid phase
k	thermal conductivity	s	droplet surface
m_l	mass of droplet	∞	free stream conditions
r	droplet radius	0	initial state
Y	mass fraction		

1. 서 론

액체 연료의 연소는 일반적으로 기체상의 연소 환경 속으로 액체 연료를 분사함으로써 이루어진다. 분사된 액체 연료는 조밀한 액적군으로 나뉘는 미립화 과정을 거쳐 연소실로 투입하게 된다. 액체 연료의 분사연소현상을 이해하기 위해서는 분사액적군을 구성하는 개개 액적의 증발 및 연소 특성을 이해하는 것이 필요하다. 정지된

공간 내의 단일액적의 증발률은 d^2 법칙으로 대표된다. 그러나 여러 개의 액적들이 연소할 때는 액적-액적, 액적-주위가스간의 상호작용에 의하여 단일액적의 연소(증발)와는 다른 특성을 나타내므로 액적군의 연소특성의 정확한 해석을 위해서는 액적간의 상호작용을 규명한 후 연소특성을 정량화하는 것이 필요하다.

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

* 고려대학교 기계공학과 대학원

† 연락저자, thermoch@korea.ac.kr

** 고려대학교 기계공학과

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

Abramzon과 Sirignano[3]는 내부 순환 유동이 있는 움직이는 단일연료액적에 대해 가변적인 열역학적 물성치, 1이 아닌 Lewis수, Stefan 유동, 그리고 액적 내부의 가열을 고려하여 동적 거동과 증발 현상을 수치적으로 해석하였다.

Renksizbulut와 Yuen[4]은 고온의 공기 터널에 모세관 끝에 매달린 액적의 열전달율을 측정하여 Nu에 대한 정상상태 상관식을 제안하였다.

Wang과 Ueng[5]은 자유낙하하는 단일연료액적에 대한 실험을 통해 시간에 따른 화염형태의 변화를 관찰하였다. 이들은 액적의 반경에 대한 공기와의 상대속도의 비(V_{rel}/r)가 크거나 주위 온도가 낮을 때 envelope 화염에서 side 화염 그리고 wake 화염으로 점차적으로 변화하는 것을 관찰하였다.

Nagata와 Kudo 등[6]은 미소중력 하에서 2차원으로 배열된 준액적(quasi-droplet)들을 대상으로 연소상호작용에 대해 실험적으로 연구하였다. 이들은 상온에서 액체와 고체로 존재하는 연료성분을 혼합하여 만든 준액적들의 거리 변화가 화염의 형태 및 화염거리 그리고 화염의 움직임에 크게 영향을 미친다는 것을 보였다.

액체연료를 사용하는 분무연소에 대한 이론적인 해석을 위해서는 연소실에 분사된 많은 개별적인 연료액적들의 증발율, 궤적, 분포형태, 그리고 점화위치 등과 같은 중요한 요소들에 관한 적절한 예측이 필요하다. 이러한 요소들은 액적증발모델에 의해 크게 영향을 받는다[3].

그러나 대부분의 액적증발모델은 단일액적에 대한 해석을 토대로 하고 있기 때문에 조밀한 액적군으로 구성된 분무연소현상을 해석하는데 있어서 단일액적 시스템에서는 볼 수 없는 액적간의 상호작용 등에 의한 영향을 고려해야 한다.

본 연구에서는 액적들의 배열과 대류의 영향이 액적의 증발 및 연소특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 고온 공기 중에 순간적으로 노출된 옥탄(octane) 액적들을 대상으로 대류의 영향뿐만 아니라 종방향 및 횡방향의 거리변화 등과 같은 다양한 조건 하에서 액적간의 상호작용이 화염의 구조 및 액적들의 증발을 등에 미치는 영향을 수치적으로 규명한다

2. 이론해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 액적들이 2차원 선형적으로 배열되어 있을 때 해석영역에 대해서

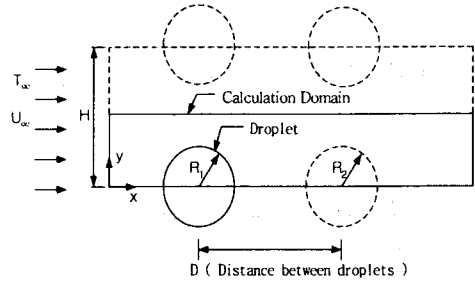


Fig. 1 Schematics of computational domain

대칭조건을 적용함으로써 고정된 두 개의 액적을 대상으로 한 계산을 통해서도 이들 액적들에 의한 영향을 해석할 수 있다.

고온 공기 중에서 증발하는 연료액적의 반경은 시간에 따라 감소하며 수치해석 시 시간단계마다 격자점들이 이동하게 된다. 이전 시간단계에서 계산된 속도를 다음 시간단계에 적용하기 위해서 이동된 격자점에 대한 상대속도를 고려하여 기체상에 대한 지배방정식을 나타내면 다음과 같다 [7].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \left(u_i - \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_i - \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) u_j \right\} \\ = - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_j - \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) h \right\} \\ = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \sum_k \Delta h_k \dot{w}_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_j - \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) Y_k \right\} \\ = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + \sum_k \dot{w}_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$p = \rho R_u T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{W_i} \quad (5)$$

2.2 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 온도가 1250K이고 압력이 10기압인 고온공기 중에 액적이 분사됨으로써 공기와 일정한 상대속도로 증발, 연소하는 즉 고정된 액적에 대하여 계산하였다. 이때 액적의 온도는 습구온도(wet bulb temperature) 근처인 420K로 계산과정동안 균일한 온도를 갖는다고 하였다. 이러한 조건과 Re 80에서 Weber 수는 대략 4이므로 액적은 거의 구형이 되며 변형은 무시될 수 있다[8]. 또한 이러한 조건 하에서 고온의 기체상으로부터 액적으로 전달된 모든 열은 액적의 증

발에 이용된다고 가정할 수 있다. 이러한 조건은 액적의 초기가열과정을 무시하게 되지만 액적의 연소거동에 대해 좀더 상세하게 연구할 수 있다. 각 성분의 상태량에 대한 값들은 각 성분의 혼합 분율을 이용하여 계산하였으며[9], 나머지는 Table 1에 정리하였다.

액적 표면에서 평행한 속도성분은 미끄럼이 없는 경계조건을, 그리고 계산영역으로 유입되는 공기는 균일한 속도를 갖는다고 가정하였다.

Table 1 Physical and thermodynamic properties

Density, fuel [kg/m ³]	696
Initial droplet temperature [K]	420
Latent heat [J/kg]	300000
Prandtl Number	0.7
Initial Droplet Diameter [μ m]	100

2.3 액적 표면 경계조건 및 반경변화를

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

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

위 식에서 h 는 대류열전달계수(heat transfer coefficient)이고 Q_i 은 증발잠열이다.

액적 내부의 온도는 균일하게 함으로써 좌변항은 0이 되고 고온 기체상에서 연료 액적 표면으로 열전도에 의하여 전달되는 열유속(heat flux)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = -k_g \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s \quad (7)$$

이때 $\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s$ 는 액적 주위 기체상의 온도분포로부터 구하며, 수치계산시 각 셀에 대한 값을 합한 값이다. 주위 기체상의 온도는 유동에 의한 대류의 영향으로 화염과 액적간의 거리가 가까운 앞쪽의 온도구배가 크다. 식(6)과 식(7)로부터 반경변화를 계산하면 다음과 같다.

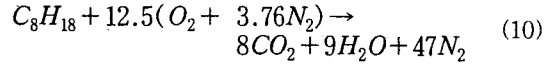
$$\frac{dr}{dt} = - \frac{k_g}{\rho_i Q_i} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s \quad (8)$$

또한 액적 표면에서 전달되는 연료성분의 수직 방향속도를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_i v_i = \rho_s v_s \quad (9)$$

2.4 화학반응

연료와 공기의 이상적인 반응으로 가정하면 아래와 같이 쓸 수 있다.



1단계 2차 Arrhenius 반응 모델[2,10]을 이용하여 다음과 같이 반응률을 계산하였다.

$$\dot{\omega}_k = -A_r \rho_g^{a+b} \frac{Y_f^a Y_o^b}{W_f^a W_o^b} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (11)$$

여기서 $A_r = 4.6 \times 10^{14}$

$a = 0.25$

$b = 1.5$

$E_a = 125604 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$

2.5 수치 해석

Poisson계 방정식을 이용한 타원형 격자생성법을 이용하여 액적의 표면에서는 5°간격으로 격자점을 구성하였다. 여기서 전체 계산영역을 4~6개의 구역으로 나누어 액적간의 거리가 다른 경우에도 액적을 포함하는 구역 내의 격자점들은 동일한 격자간격을 갖도록하여 일관성이 있는 계산이 되도록 하였다. 전체 계산 영역은 주유동 방향으로 261개, 수직방향으로 21개를 기준으로 최대 69개의 비균일 격자계를 구성하였다.

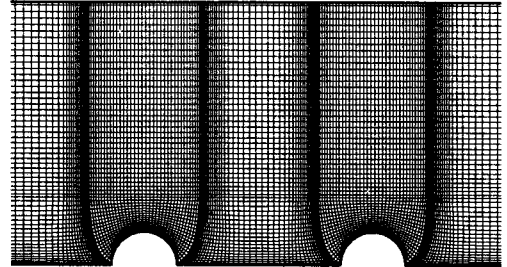


Fig. 2 Grid configuration

Fig. 2는 6개의 구역으로 구성된 H=16R₀, D=7R₀ 격자계의 일부를 나타낸 것이다.

연속방정식 및 압력장에서의 진동해를 막기 위해서 엇갈림 격자계(staggered grid)를 사용하였고 Implicit 방법 및 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였으며 대류항은 Power law scheme을 이용하였다. 전달방정식은 일반좌표계로 변환한 다음 계산영역에서 계산하였다. 또한 시간에 따라 액적의 반경이 변화하기 때문에 격자점 이동에 따른 유체의 상대속도를 고려하여 계산하였다. 수치계산에 앞서 계산 code를 검증하기 위하여 Re=40일 때 액적 표면의 압력계수(C_p) 분포를 Fig. 3에서 Grove와 Shair 등[11]의 실험적인 결과와 비교하였다. 압력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{p_s - p_\infty}{\rho_g u_{g,\infty}^2 / 2} \quad (12)$$

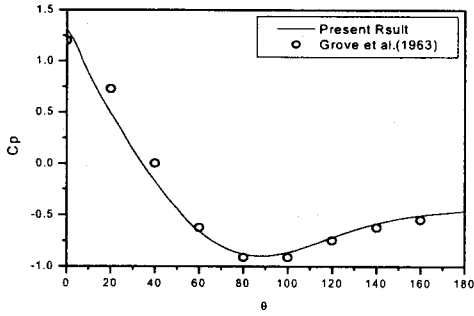


Fig. 3 Comparison between the pressure distribution obtained by the present work and experimental results

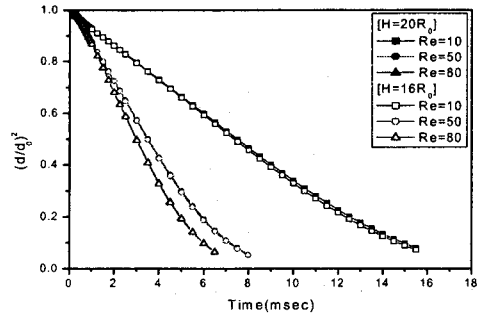


Fig. 4 Comparison between $H=16R_0$ and $H=20R_0$ for various Re

3. 결과

3.1 Re변화에 따른 영향

Fig. 4는 뒤에 액적이 없을 때 액적간의 수직거리, $H=16R_0$, $20R_0$ 인 경우에 여러 가지 Re 에 대해서 시간에 따른 $(d/d_0)^2$ 의 변화율을 나타낸 것이다. 이 두가지 경우에 비교적 큰 Re 에서는 액적간의 수직거리의 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있는 반면에 $Re=10$ 인 경우 $H=16R_0$ 인 경우가

$20R_0$ 인 경우보다 직경의 감소율이 약간 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 것은 액적간의 수직거리가 좁혀짐에 따라 유동장은 가속되고 Nu 가 증가하는 벤츄리 효과(venturi effect)때문이다[12](이것에 대해서는 뒤에 다시 논의하게 될 것이다).

이러한 벤츄리 효과에 의해 $(d/d_0)^2$ 의 변화율에 있어서 약간의 차이가 있지만 그 차이가 비교적 작기 때문에 본 연구에서는 $H=16R_0$ 인 경우를 기준으로 액적간의 2차원 배열에 따른 상호작용을 연구하였다.

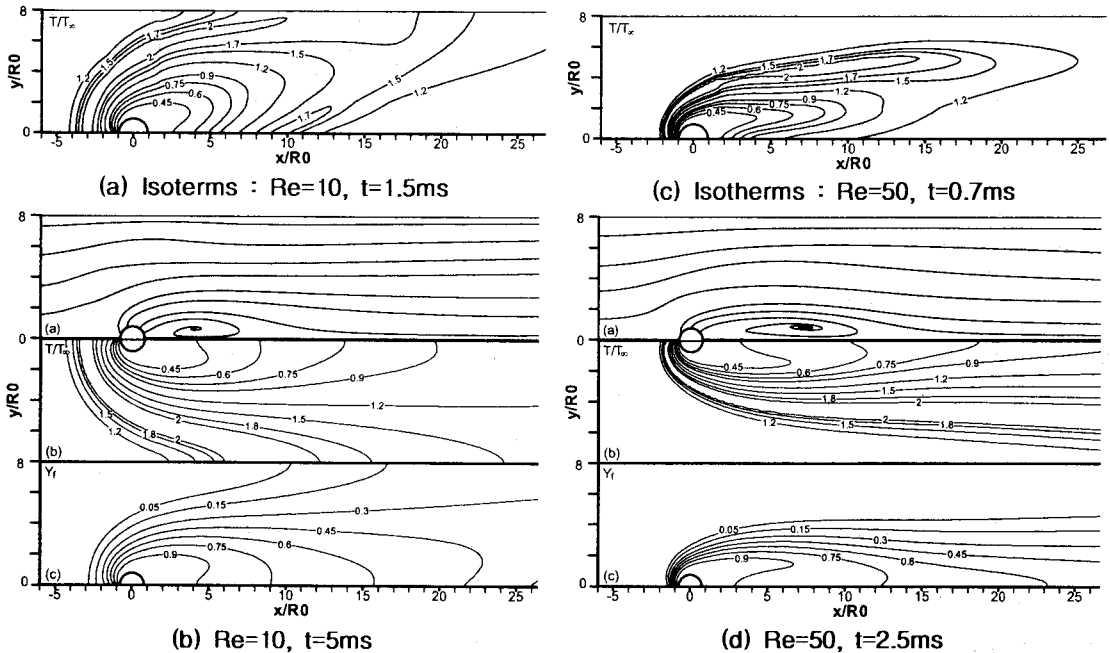


Fig. 5 Streamlines, isotherms and fuel mass fraction contours for the different Re at $H=16R_0$: $Re=10$ (a-b), $Re=50$ (c-d)

Fig. 5는 각각 $H=16R_0$ 일 때 $Re=10$ 과 50에 대한 액적 수명의 초기와 중기에 해당하는 온도, 유선과 연료질량분율에 대한 분포를 나타낸 것이다.

고온공기 중에 갑자기 노출된 액적은 초기에 연료성분이 증발하면서 주위에 원형형태의 화염 영역이 형성되고 난 후 증발된 연료성분의 양이 증가하면서 Fig. 5의 (a), (c)에서 보이는 것처럼 액적 뒤의 산소성분이 연료성분에 의해 쓸려나가게 된다. 이후에 (b)에 보이는 것처럼 $Re=10$ 에서 액적 주위의 화염영역은 성장하여 액적과 화학까

지의 거리가 대략 $3R_0$ (수평방향)에서 $8R_0$ (수직방향)에 이르기까지 두껍고 넓은 형태를 나타내게 된다. 또한 유입되는 산소성분은 액적의 앞부분에 위치한 외피화염영역에서만 소비되며 뒤쪽으로는 미연연료성분이 넓게 분포하면서 앞부분을 제외한 액적 대부분의 영역이 보다 낮은 온도분포를 나타낸다. 반면에 (d)에서 보이는 $Re=50$ 의 경우 강한 대류의 영향으로 액적 앞부분에 화염영역이 $Re=10$ 의 경우보다 대략 50% 감소한 위치에 상대적으로 좁게 형성되지만 화염영역과 액적간의 거리가 좁아지면서 액적으로의 열전달이 증가하게 된다.

고온의 공기 중에 노출된 연료 액적이 증발할 때 액적에서 증발되어 전달되는 연료성분은 액적 표면 근처의 불균일한 온도 및 밀도에 의하여 위치에 따라 다른 속도를 갖는다. 본 연구에서는 액적에서 전달되는 연료성분의 속도는 액적 표면에 대해 수직인 성분만을 갖도록 하였다.

Fig. 5에서 보이는 액적 주위의 유선(stream line)은 이러한 blowing 효과[7]를 고려한 결과이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 액적간의 수직거리(H)가 $16R_0$ 일 때 시간에 따른 액적의 증발율과 $(d/d_0)^2$ 의 변화를 각각의 Re 에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 m_0 는 초기 액적 질량을 나타낸다. 연료액적이 고온공기 중에 노출될 때 액적이 증발하면서 갑작스럽게 액적 주위에 원형형태의 화염이 생성되기 때문에 초기에는 증발율이 다소 크게 나타났다. 저 Re 에서는 비교적 증발율이 낮고 $(d/d_0)^2$ 의 변화율이 선형적인 형태를 나타낸다. 반면에 고 Re 에서는 증발율이 급격하게 증가하고 $(d/d_0)^2$ 의 변화율이 큰 것을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 살펴본 바와 같이 작은 Re 에서 액적 주위의 화염영역이 넓게 분포하는 형태에서는 화염영역과 액적과의 거리가 상대적으로 멀고 그 사이에는 미연연료성분이 두꺼운 층을 형성하고 있기 때문에 액적으로의 열전달이 감소한다. 그러나 Re 가 증가함에 따라 강한 대류의 영향으로 화염영역이 좁고 액적과의 거리가 좁기 때문에 액적으로 열전달이 증가하면서 증발율 및 $(d/d_0)^2$ 의 변화율이 급격히 증가한다. 이와 반대로 액적의 수명은 Re 가 증가함에 따라 상당히 감소하게 된다. Renksizbulut와 Yuen[4]은 고온의 공기 유동장에 설치된 모세관 끝에 매달린 액적에 대한 실험을 바탕으로 다음과 같은 상관식(correlation)을 제안하였다.

$$Nu_f(1+B_f)^{0.7} = 2 + 0.57 Re_m^{1/2} Pr_f^{1/3} \quad (13)$$

$$\text{여기서 } B_f = \frac{C_{p,g}(T_\infty - T_s)/Q_l}{Re_m = 2R\rho_\infty v_\infty/\mu_f}$$

위의 식에서 하첨자 f 는 액막상태(film condition)를 나타낸다. Yuen과 Chen[3,13]이 아래와 같이 제안한 1/3 규칙('1/3 rule')을 이용하여 액

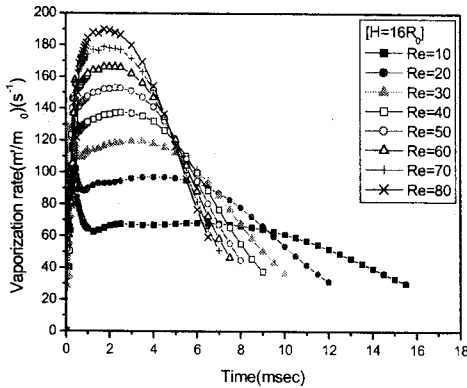


Fig. 6 Variation of the vaporization rate with Re

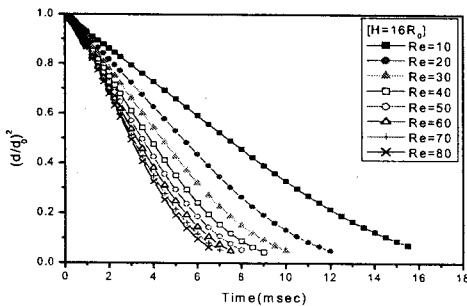


Fig. 7 Variation of $(d/d_0)^2$ with Re

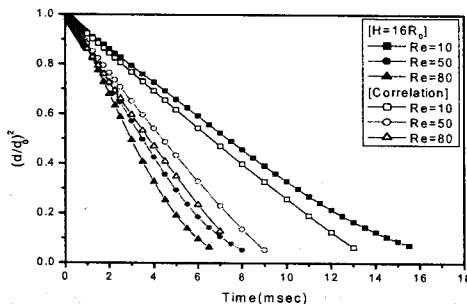


Fig. 8 Comparison between the different calculations of $(d/d_0)^2$ for various Re

막 상태에 해당하는 액적 표면 근처의 온도 및 연료성분의 농도를 계산하여 상관식을 이용한 계산에 적용하였다.

$$\bar{T} = T_s + \frac{1}{3}(T_\infty - T_s) \quad (14)$$

$$\bar{Y} = Y_{fs} + \frac{1}{3}(Y_{f\infty} - Y_{fs})$$

Fig. 8은 Re가 10, 50 그리고 80일 때 앞서 해석한 결과와 식(13)과 식(14)를 사용하여 얻어진 $(d/d_0)^2$ 의 변화율을 비교하여 나타내었다.

시간에 따른 $(d/d_0)^2$ 의 변화율에 있어서 계산된 값들은 상관식을 이용한 결과보다 저 Re에서는 더 작게 그리고 고 Re에서는 더 크게 나타났다. 액적의 수명에 있어서는 저 Re에서 더 길게 그리고 고 Re에서는 더 짧게 나타났다. 이러한 차이는 액적 증발에 의한 blowing이 액적 표면으로의 열전달을 급격히 감소시키기 때문이다[8]. 또한 정상상태 해석을 통해 제안된 Renksizbulut와 Yuen[4]의 상관식은 순간적인 기체상의 구성 성분과 상태량의 변화에 대한 고려가 없었으며 [2], 화학반응에 의해서 형성되는 화염영역과 화염형태의 시간에 따른 변화 그리고 이로 인한 액적으로의 열전달과 같은 상호작용 등에 관한 고려가 없었다는데 그 원인이 있다고 할 수 있다. 따라서 상관식은 화염형태의 비정상적인 변화에 대해서는 다소 한계가 있다고 할 수 있다

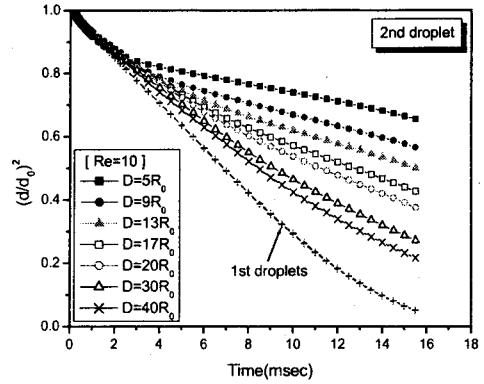


Fig. 9 Variation of $(d/d_0)^2$ with the horizontal spacing at $Re=10$ and $H=16R_0$

3.2 액적간의 수평거리(D) 변화에 따른 영향

Fig. 9는 앞에서 보인 바와 같이 액적간의 수직 거리에 따른 상호작용이 상대적으로 상당히 감소한 $H=16R_0$ 일 때 $Re=10$ 에서 액적간의 수평거리(D)를 변화시켰을 때 선두액적 및 후미 액적의 $(d/d_0)^2$ 의 시간 변화율을 나타낸다.

유동방향에 대해서 선두 액적의 $(d/d_0)^2$ 의 시간 변화율은 Fig. 9에서 보이는 것처럼 후미 액적과의

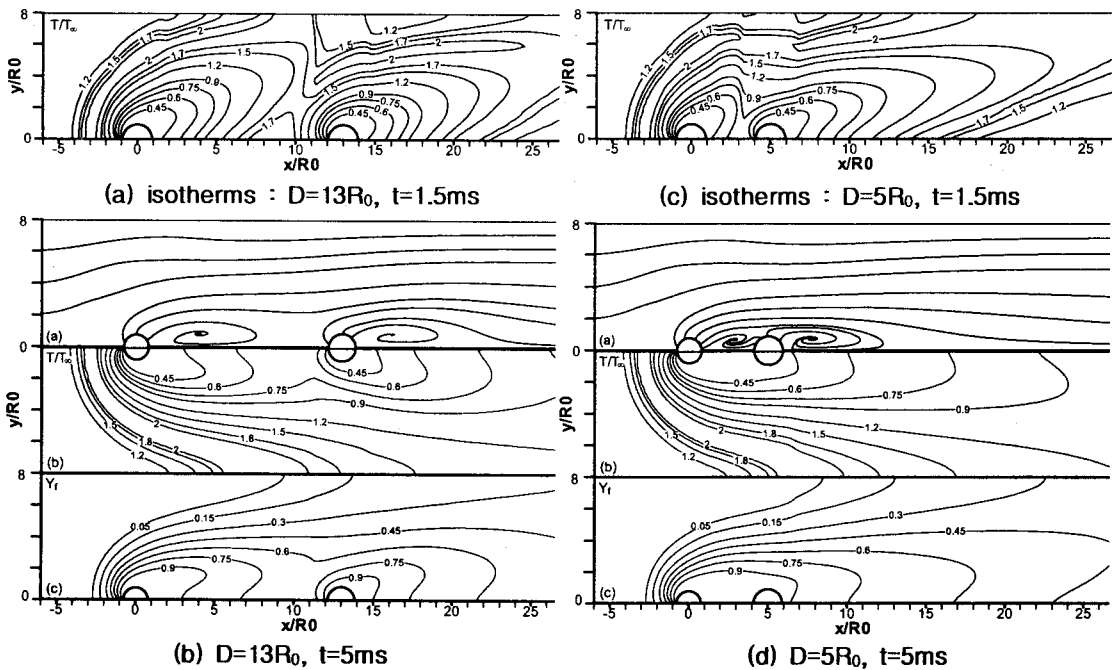


Fig. 10 Streamlines, isotherms and fuel mass fraction contours of the different droplet horizontal spacings at $Re=10$ and $H=16R_0$: $D=13R_0$ (a-b), $D=5R_0$ (c-d)

거리가 좁혀지더라도 영향을 거의 받지 않는다. 그러나 후미 액적의 $(d/d_0)^2$ 변화율은 선두액 적과의 거리가 좁혀짐에 따라 선두액적에 비해 급격히 감소하게 되고 반면에 선두액적과 거리가 멀수록 선두액적의 $(d/d_0)^2$ 변화율에 가까워짐을 알 수 있다. 고온공기 중에 순간적으로 노출된 두 액적은 Fig. 10의 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 각각 외피화염을 형성하면서 단일액적처럼 연소하게 되는데 두 액적에서 증발된 연료성분에 의해 액적의 뒷부분에 있던 산소성분은 쓸려나가게 된다. 또한 두 액적사이의 산소성분 중 일부는 후미액적 주위의 외피화염에서 소모되며 산소성분이 쓸려나가기 전까지 후미액적은 계속해서 외피화염을 형성하면서 연소하게 된다. 이후에 두 액적사이의 산소성분이 모두 쓸려나가면서 두 개의 외피화염은 Fig. 10의 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 단일외피화염으로 변화하게 된다[6]. 따라서 액적간의 거리가 멀수록 각각의 액적들 주위에 형성된 외피화염이 단일외피화염으로 되는 시간이 오래 걸리게 된다. 선두액적에 형성된 외피화염은 단일외피화염이 될 때까지 성장하면서 두터운 화염영역을 형성하는 것을 볼 수 있는 반면에 뒤에 있는 액적은 이러한 화염형태의 변화와 선두액적에서 전달된 미연연료성분의 영향으로 고온영역으로부터의 액적으로 열전달이 감소하면서 증발율이 급격히 감소하게 된다. Fig. 10의 (c) 경우처럼 두 액적간의 거리가 상대적으로 더 가까울수록 이러한 현상은 더 빨리 일어나고 단일 외피화염을 형성하고 난 뒤에는 Fig. 10의 (d)에서 볼 수 있는 것처럼 선두액적에서 증발된 연료 성분은 두 액적 사이뿐만 아니라 뒤에 있는 액적의 뒷부분까지 직접적으로 전달되고 후미액적에서 증발된 연료성분 또한 두 액적사이에 축적되면서 액적간의 상호작용이 크게 증가한다. 본 해석의 결과에서 $Re=10$ 일 때 액적간의 수평거리(D)가 $10R_0$ 이하에서는 이와 같은 강한 상호작용이 나타났다.

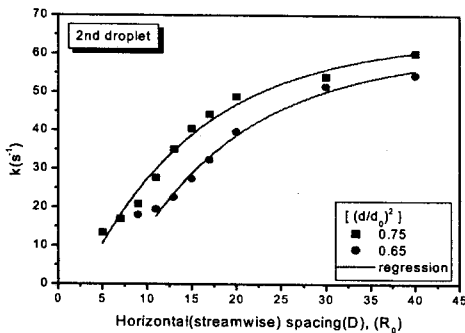


Fig. 11 Variation of k with the horizontal spacing for the second droplet at $Re=10$ and $H=16R_0$

액적간의 수평거리가 증가함에 따라 단일외피화염을 형성하기 전까지 단일액적과 유사한 연소 거동을 하기 때문에 Fig. 9에서 보이는 것처럼 여러 가지 액적간의 수평거리에 대해서 액적수명의 초기에 선두액적과 비슷한 $(d/d_0)^2$ 변화율을 보이다가 이후에 급격한 기울기의 감소가 나타나게 된다. 액적의 수명 또한 선두액적에 비해 후미에 있는 액적들은 액적간의 수평거리가 가까워질수록 증발율이 감소하기 때문에 더욱 길어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 액적 연소의 비정상 상태 해석에서만 관찰할 수 있는 특성이다.

Fig. 11은 $Re=10$ 일 때 액적간의 수평거리(D) 변화에 따른 후미액적의 증발율의 변화를 $(d/d_0)^2 = 0.75$ 와 $(d/d_0)^2 = 0.65$ 에 대해서 나타낸 것이다. 두 액적간의 거리를 $5R_0$ 에서 $40R_0$ 까지 폭넓게 계산하였으며 액적간의 수평거리(D) 변화에 따라 후미액적의 증발율이 점진적으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러나 수평거리가 $10R_0$ 이하가 되는 경우에는 이러한 변화에서 다소 벗어나는 경향이 보이는 것은 위에서 논의한 바와 같이 이 거리에서는 단일외피화염의 영향뿐만 아니라 두 액적간의 연료성분 전달에 대한 강한 상호작용이 발생하기 때문이다. 액적간의 수평거리(D)에 따른 증발율의 변화는 식(15)와 같은 관계식으로 표현할 수 있으며 계수는 Table 2에 나타내었다.

$$\frac{\dot{m}}{m_0} = -k = A_1 + A_2 \cdot \exp\left(\frac{-D}{A_3}\right) \quad (15)$$

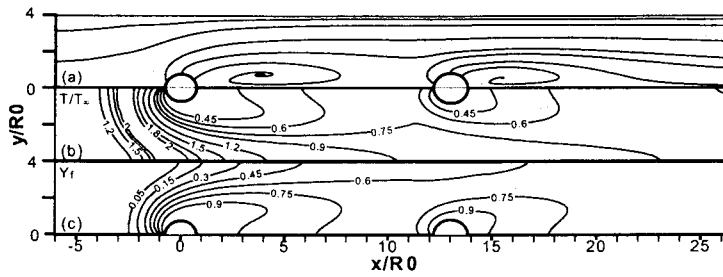
$$(5R_0 \leq D \leq 40R_0)$$

Table 2 Coefficients of the horizontal spacing relation ($H=16R_0$, $Re=10$)

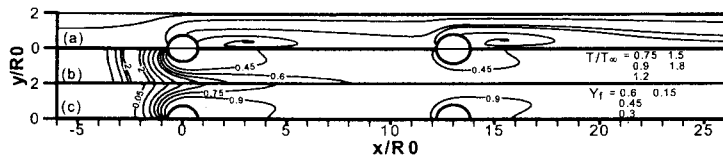
$(d/d_0)^2$	A_1	A_2	A_3
0.75	64.0	-78.0	13.3
0.65	60.5	-96.8	13.5

3.3 액적간의 수직거리(H) 변화에 따른 영향

Fig. 12는 액적간의 수평거리가 $13R_0$ 인 두 액적에 대해 액적간의 수직거리(H)가 각각 $8R_0$ 와 $4R_0$ 일 때 $Re=10$ 에서 유선, 온도분포와 연료질량분율을 나타낸 것이다. 액적간의 수직거리가 $16R_0$ 인 Fig. 10(b)의 경우 화염영역이 선두액적의 뒤쪽까지 형성되어 있는 것을 볼 수 있는 반면에 Fig. 12의 경우 액적간의 수직거리가 좁을수록 화염이 선두액적의 앞부분에 거의 수직하게 가로놓이는 형태가 되는 것을 볼 수 있다. 이러한 화염의 형태는 Nagata와 Kudo 등[6]의 실험을 통한 결과에서도 관찰되었다. 이들은 2차원 배열의 준액적들을 점화 후 나하시킴으로써 액적



(a) $H=8R_0$, $D=13R_0$, $Re=10$, $t=5ms$



(b) $H=4R_0$, $D=13R_0$, $Re=10$, $t=5ms$

Fig. 12 Streamlines, isotherms and fuel mass fraction contours of the different droplet vertical spacings at $Re=10$ and $D=13R_0$: $H=8R_0$ (a), $H=4R_0$ (b)

간의 거리변화에 따른 화염의 두께 및 형태 등을 관찰하였다. 이들은 액적간의 거리가 가까운 배열의 경우 원형의 화염형태를 보이는데 반해 액적간의 거리가 멀어질수록 화염영역의 끝이 두 액적사이에서 만나게 되면서 2차원으로 배열된 액적들이 잎(leaf) 형태의 화염을 형성하는 것을 보였다. 본 연구의 결과 또한 이와 유사한 화염 형태를 보이는 것을 알 수 있다.

$H=4R_0$ 인 경우 후미액적은 $H=16R_0$ (Fig. 14(b))와 $H=8R_0$ 인 경우(Fig. 12(a))보다 주위 온도는 더 낮게 분포하고 있으며 더 농후한 연료성분으로 둘러 쌓여 있다. 그럼에도 불구하고 액적간의 수직거리가 좁혀짐에 따라 유동장은 가속되고 Nu 가 증가하는 벤츄리 효과(venturi effect)가 나타난다[12]. 이러한 벤츄리 효과로 인하여 대류의 영향이 커지기 때문에 Fig. 13과 Fig. 14에서 볼 수 있는 것처럼 액적간의 수직거리가 좁혀짐에 따라 선두액적과 후미액적 모두 $(d/d_0)^2$ 의 변화율이 다소 증가하게 된다. Fig. 13과 Fig. 14는 $D=13R_0$ 일 때 액적간의 수직거리 변화에 대해서 선두액적과 후미액적의 시간에 따른 $(d/d_0)^2$ 의 변화율을 나타낸 것이다. Fig. 14에 나타난 후미액적에 대한 $(d/d_0)^2$ 의 변화율은 $H=16R_0$, $D=13R_0$ 인 경우(*모양)의 $(d/d_0)^2$ 의 변화율과 유사한 경향을 갖으면서 액적간의 수직거리가 감소함에 따라 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 이를 통해서 후미액적은 앞서 논의한 선두액적과의 수평거리(D) 변화에 따른 영향과 수직거리(H) 변화에 따른 영향이 복합적으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

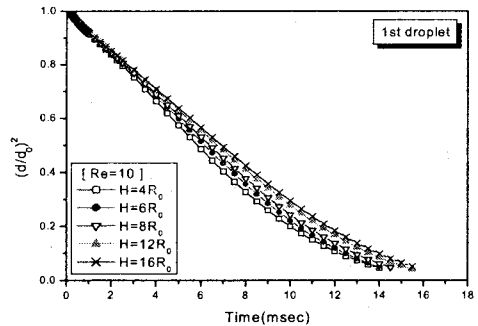


Fig. 13 Variation of $(d/d_0)^2$ with the vertical spacing for the first droplet at $D=13R_0$

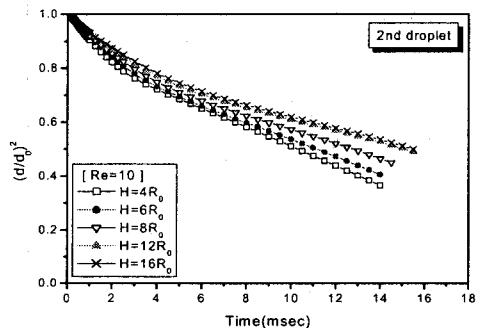


Fig. 14 Variation of $(d/d_0)^2$ with the vertical spacing for the second droplet at $D=13R_0$

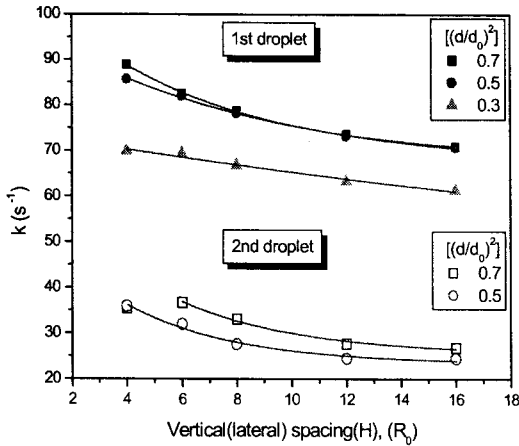


Fig. 15 Variation of k with the vertical spacing for some $(d/d_0)^2$ at $D=13R_0$

Fig. 15는 $Re=10$ 이고 액적간의 수평거리, $D=13R_0$ 인 두 액적들에 대해서 액적간의 수직거리 (H) 변화에 따른 증발율의 변화를 나타낸 것이다. 선두액적의 경우 $(d/d_0)^2$ 의 값이 작아지면서 즉 선두액적의 반경이 감소하면서 벤츄리 효과가 감소하기 때문에 액적간의 수직거리(H) 변화에 대해서 증발율의 차이가 점차 감소한다. 후미액적 역시 반경이 감소함에 따라 그리고 액적간의 수직거리(H)가 증가함에 따라 벤츄리 효과가 감소하기 때문에 증발율이 점근적으로 감소한다. 다만 $H=4R_0$ 일 때 후미액적은 상대적으로 증발율이 높긴 하지만 주위에 농후한 연료성분이 분포함으로써 $(d/d_0)^2=0.7, 0.5$ 일 때 거의 일정한 증발율을 나타낸다. 결국 두 액적 모두 그 값이 크진 않지만 액적간의 수직거리가 증가함에 따라 점근적으로 감소함을 볼 수 있으며 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있으며 계수들은 Table 3에 정리하였다.

$$\frac{\dot{m}}{m_0} = -k = B_1 + B_2 \cdot \exp\left(\frac{-H}{B_3}\right) \quad (16)$$

$$(4R_0 \leq H \leq 16R_0)$$

Table 3 Coefficients of the vertical spacing relation ($D=13R_0$, $Re=10$)

$(d/d_0)^2$	1st droplet			2nd droplet		
	B_1	B_2	B_3	B_1	B_2	B_3
0.7	68.5	41.0	5.7	25.3	45.3	4.4
0.5	66.0	32.5	8.1	23.3	35.5	4.0
0.3	38.3	35.7	35.4	-	-	-

4. 결론

연료 액적들의 2차원 선형적인 배열이 증발 및 연소특성에 미치는 영향을 보기 위하여 비정상상태의 연소거동을 연구하였다. 이 연구의 결론은 다음과 같다.

연료액적의 증발률은 시간에 따른 화염 형태의 변화에 의한 영향이 크며, Re 가 증가함에 따라 화염형태의 변화와 대류의 영향으로 단일액적의 증발률은 증가한다.

주유동방향에 종렬로 위치한 연료 액적들은 고온공기 중에 노출될 때 처음에는 각각 외피화염을 형성하면서 단일액적과 유사하게 연소하다가 선두액적에서 증발된 미연연료성분에 의해 산소성분이 쓸려나가면서 단일외피화염을 형성한다. 선두액적은 후미액적과의 거리 변화에 따른 영향이 거의 없지만, 후미액적은 선두액적과 거리가 가까워짐에 따라 주로 선두액적에서 전달된 미연연료 성분의 영향으로 상호작용이 증가하면서 증발률이 급격히 감소하고 거리가 증가함에 따라 점근적으로 증가한다.

액적간의 수직거리가 감소함에 따라 화염영역은 선두액적 앞부분에 수직하게 놓이는 형태가 되고 유동장은 가속되어 선두액적의 증발율이 다소 증가한다. 후미액적의 경우 선두액적과의 수평거리(유동방향)에 따른 영향과 가속된 유동장의 영향을 복합적으로 받는다. 두 액적 모두 액적간의 수직거리가 증가함에 따라 증발율은 점근적으로 감소한다.

이러한 결과를 통하여 액적간의 거리가 가까워질수록 액적의 증발 및 연소는 단일액적의 그것과는 상당히 다르며 따라서 단일액적을 대상으로 제안된 상관식은 액적간의 상대적 위치에 따른 영향이 고려되어야 할 것이다.

본 연구에서는 고려되지 않은 액적의 초기가열 과정이 액적 수명의 상당 부분을 차지한다는 연구결과가 있으므로[7], 이를 고려한 전반적인 해석이 또한 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 CERC의 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Tsai, J. S. and Arthur, M. S., "The Combustion of Linear Droplet Arrays," *23th Symposium(Int.) on combustion*, The Combustion Institute, 1990, pp. 1405-1411.

- [2] Harry, A. D. and Billy, R. S., "Calculations of Unsteady Reacting Droplet Flows," *22th Symposium(Int.) on combustion*, The Combustion Institute, 1988, pp. 1923-1929.
- [3] Abramzon, A. and Sirignano, W. A., "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 9, 1989, pp. 1605-1618.
- [4] Renksizbulut, M. and Yuen, M. C., "Experimental Study of Droplet Evaporation in a High Temperature Air Stream," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, No. 2, 1983, pp. 384-388.
- [5] Wang, C. H. and Ueng, G. J., "An Experimental Investigation of Fuel Droplet Combustion under Micro-gravity," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, No. 7, 1997, pp. 931-944.
- [6] Nagata, H., Kudo, I., Ito, K., Nakamura, S. and Takeshita, Y., "Interactive Combustion of Two-dimensionally Arranged Quasi-droplet Clusters under Microgravity," *Combustion and Flame*, Vol. 129, 2002, pp. 392-400.
- [7] Haywood, R. and Renksizbulut, M., "On Variable-Property, Blowing, and Transient Effects in Convective Droplet Evaporation with Internal Circulation," *Proc. of 18th Int. Heat Transfer Conference*, 1986, pp. 1861-1866.
- [8] Kuo, K. K., "Principles of Combustion," *Wiley*, New York, 1986.
- [9] Turns, S. R., "An Introduction to Combustion," *McGraw-Hill*, Singapore, 2000.
- [10] Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 27, 1981, pp. 31-43.
- [11] Grove, A. S., Shair, F. H., Petersen, E. E. and Acrivos, A., "An Experimental Investigation of the Steady Separated Flow Past a Circular Cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 19, No. 1, 1963, pp. 60-85.
- [12] Sirignano, W. L., "Fuel Droplet Vaporization and Spray Combustion Theory," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 9, 1983, pp. 291-322.
- [13] Yuen, M. C. and Chen, L. W., "On Drag of Evaporating Liquid Droplets," *Combustion Sci. Tech.*, Vol. 14, 1976, pp. 86-91.