

<論 文>

액체연료 액적군의 비정상 집단연소

김 호 영*

(1984년 8월 17일 접수)

Non-Steady Group Combustion of Liquid Fuel Droplets

Ho Young Kim

Abstract

A non-steady group combustion model of a spherical droplets cloud has been developed to access the non-steady effects of collective behavior of fuel droplets on combustion characteristics and cloud structure. A system of conservation equations of droplets cloud in axisymmetric spherical coordinate was solved by numerical methods for *n*-Butylbenzene (C₁₀H₁₄).

It was found that the effect of initial droplet size on combustion characteristics is dominated compare with effects of cloud size and number density of droplets. For dense droplets cloud, external group combustion mode is established during main part of cloud life time, and internal and single droplet combustion modes are simultaneously established for the dilute droplets cloud. Radius of cloud and external envelope flame are slowly decreased during main part of cloud life time, and suddenly decreased at end of combustion period.

기 호 설 명

a : 액적의 반경

B : 질량전달수

C_p : 기체의 정압비열

D : 확산계수

f : 비증발을 함수

G : 집단연소수

K : Damkohler 수

k : 기체의 열전도계수

L : 증발잠열

m : 단일액적의 증발 또는 연소율

n : 액적의 수밀도

N : 무차원화한 액적의 수밀도

P_r : 기체의 프란틀수

q : 연소열

r : 반경방향 좌표

R_r : 외피화염의 반경

R_s : 초기 액적군의 반경

T : 온도

t : 시간

U : 무차원화한 속도

V : 기체의 속도

W_i : *i*성분의 분자량

Y_i : *i*성분의 질량비(mass fraction)

*정회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

그리스 문자

- α : 기체의 열확산 계수
- α_i : Shvab-Zeldovich 변수
- β : 일반적인 변수
- ρ : 밀도
- μ : 기체의 점성
- ν_i : i 성분에 대한 Stoichiometric 계수
- ζ : 무차원화한 액적의 반경
- η : 무차원 반경방향 좌표
- τ : 무차원 시간

참 자

- O : 산소
- F : 연료
- b : 비등점
- C_i : 초기상태 및 액적군의 중심
- L : 액체연료

1. 서 론

액체연료를 작은 크기의 액적들로 분사시켜 액적군(droplet cloud)으로 연소시키는 분사연소(spray combustion)방식은 대부분의 액체연료 연소기에서 이용되고 있다. 이들 연소기에서 효율의 증대 및 공해물질 생성의 억제라는 궁극적인 목표를 달성시키기 위하여, 단일 액적의 연소에 관한 많은 연구들과 아울러 액적군의 연소에 관한 많은 연구가 행하여 졌으며 현재 진행되고 있다. 액적군의 연소는 집단연소(group combustion)라는 단어로 집약되는데, Chiu 그룹^(1~4)과 Labowsky 그룹^(5~7)등의 이론적인 연구와 Chigier 그룹^(8,9,10)과 Onuma 와 Ogasawara^(11,12)등의 실험적인 연구들이 있다. 이들에 의하여 액적군은 그 내부의 액적들이 각각 연소하기 보다는 액적들은 증발만 하고, 증발된 연료는 액적군 외부에서 산소와 반응, 외피화염(envelope flame)을 이루며 연소하는 외부집단연소(external group combustion)상태가 실제 연소기의 연소상태라는 것을 입증하였다. 또한 액적군내의 액적의 분포상태가 덜 조밀할 때는 외피화염은 액적군 내부에 위치하고 외피화염 외부의 액적들은 단일 액적연소상태로 존재하며, 액적군 중심까지 침투하여 모든 액적들은 단일액적연소상태로 존재한다. 이 상태들을 내부집단연소(internal group combustion)와 단일액적연소(single droplet combustion)라 한다. 정지된 액적군의 집단연소현상에 대하여는 Chiu et al,^(1,3)에 의한 구의 형상을 갖는 액적군의 정상상태하의 연소에 관한

연구가 있으며, Labowsky et al.^(5,6,7)에 의한 집단연소에 대한 연구, 두개 또는 3개의 액적들 간의 연소현상에 관하여 Umemura et al.⁽¹³⁾과 Twardus 와 Brzustowski⁽¹⁴⁾등에 의한 정상상태하의 연소특성에 관한 연구들이 있다.

현재로는 디젤엔진 연소실 또는 개발중인 맥동연소기(pulsating combustor)등의 주기적으로 연료를 분사시켜 비정상 상태로 이루어진 주기를 연속적으로 갖는 연소기의 집단연소 상태에 관한 연구가 필요한 실정이다. 비정상 상태하의 액적연소에 관한 연구로는 Isoda 와 Kumagai⁽¹⁵⁾, Waldman⁽¹⁶⁾, Botros et al.⁽¹⁷⁾, Sangiovanni⁽¹⁸⁾등의 단일액적연소에 관한 많은 연구들이 있으나, 액적군의 연소에 관하여는 Correa 와 Sichel⁽¹⁹⁾에 의한 정지된 구의 형태를 갖는 액적군에서 착화와 연소시간에 대한 연구가 있으나, 연소시간, 연소형태와 특성, 화염의 성질에 관한 보다 체계적인 고찰이 요구된다.

본 연구에서는 Chiu et al.^(1,3)의 집단연소이론에 대한 비정상집단연소모델(non-steady group combustion model)을 개발, 정지된 액적군에서 초기 액적들의 분포상태, 즉 초기액적들의 크기, 수밀도 및 액적군의 크기에 따른 연소시간, 연소형태 및 특성과 화염의 성질등을 비정상 상태하에서 이론적인 모델을 통하여 고찰한다.

2. 이론해석

2.1. 지배방정식

액체연료 액적들이 군(group)을 이루어 연소할 때, 시간에 따른 집단연소성질 및 화염의 구조를 예측하기 위하여 본 논문에서는 Fig.1에서 보여주는 것과 같이 비정상 집단연소모델을 정하였다. 액적군은 초기에 일

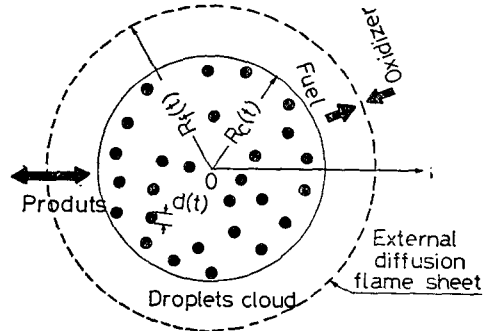


Fig. 1 Schematics of non-steady group combustion model

정한 크기의 액적들이 균일하게 분포된 구(sphere)의 형상을 이루며, 연료가 착화된 후 연소 및 증발로 인하여 액적군의 크기 및 각 위치에서의 액적 각각의 크기는 시간에 따라 감소한다.

본 모델에서는 해석상의 편의를 위하여 액적들은 구의 형상이며, 온도는 연료의 비등온도이고, Lewis 수는 1로 가정하였다. 또한 연료와 산소간의 발열화학 반응은 1 단계 반응이며, 반응열은 산소와 연료의 확산속도에 비하여 무한히 크다는 가정하에서 유도되는 수학적으로 얇은 막(sheet)을 형성하는 확산화염(diffusion flame)모델을 택하였다. 이 가정으로부터 액적군 내부에 생성되는 기체화된 연료는 외피화염 내부 또는 외부에 축적되지 못하며, 증발과 동시에 완전히 연소되는 준정상 상태(quasi-steady state)를 이루게 된다. 또한 연소유동장에서의 물리화학적인 성질들이 일정한 값을 가진다고 가정하였다. 이 가정은 좋은 평균값을 사용하면 연소상태의 해석에 큰 영향을 미치지 않는다.⁽²⁰⁾

위의 가정들을 이용, 질량, 성분 및 에너지 보존법칙들로 부터 유도된 축대칭 구좌표에서의 지배방정식들은 다음과 같다. 이때 연속방정식과 성분보존방정식들에 대한 비정상상태의 영향은 생성소멸항에 포함된, 시간에 따른 액적크기의 변화 및 온도변화에서 기인되는 증발 또는 연소율의 변화만이 고려된다.

○ 연속방정식

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = nm \tag{1}$$

우변항은 생성항이며, 액적의 수밀도(n)와 단일액적에 대한 증발 또는 연소율(\dot{m})의 곱으로 표시된다. 이때 \dot{m} 는 다음식을 사용하였다.

$$\dot{m} = \left(\frac{4\pi ak}{C_p} \right) \ln(1+B)(1+0.276R_e^{1/2}P_r^{1/3}) \tag{2}$$

이때 R_e 는 액적에 대한 Reynolds 수, B 는 질량전달수(mass transfer number)로 다음식들로 표현된다.

$$R_e = \frac{2\rho av}{\mu} \tag{3}$$

증발만 할 때의 B 는 ;

$$B_{evp} = \frac{C_p(T - T_b)}{L} \tag{4}$$

각각의 액적이 연소할 때 ;

$$B_{comb} = \frac{1}{L} \left\{ C_p(T - T_b) + \frac{qY_0}{W_0\nu_0} \right\} \tag{5}$$

Shvb-Zeldovich 변수를 사용한 연료와 산소에 대한 성분보존방정식은 다음과 같다.

○ 성분보존방정식

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v \alpha_i) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho D \frac{\partial \alpha_i}{\partial r} \right) - \frac{nm}{W_F \nu_F} \tag{6}$$

($i=0$; 산소, $i=F$; 연료)

위식에 대한 생성소멸항은, 연료에 대하여는 액적들이 외피화염내부에서 증발만 할 때 생성항이며, 산소에 대하여는 액적들이 단일액적연소를 할 때 소멸항으로 존재한다.

액적들이 증발 또는 연소할 때 에너지 생성 및 소멸을 고려하고, 온도에 대한 Shvb-Zeldovich 변수를 사용한 에너지 방정식은 다음과 같다.

○ 에너지 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \alpha_T) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v \alpha_T) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{k}{C_p} \frac{\partial \alpha_T}{\partial r} \right) - nm \left(\frac{L}{q} - \frac{b}{W_F \nu_F} \right) \\ &+ \frac{C}{W_F \nu_F R_e^2} \int_0^{R_e} nm r^2 dr \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)의 첫번째 생성소멸항은 증발 또는 단일액적연소로 인한 에너지 소멸 및 생성을 나타내며, 이때 b 는 상수로서 액적들이 증발만 할 때 b 는 0이고 연소할 때 b 는 1이다. 두번째 항은 외피화염으로 부터 방출되는 연소열로 외피화염에서만 c 가 1이며, 그 이외에는 0이다. 위의 식들에서 사용한 Shvb-Zeldovich 변수들은 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \alpha_F &= \frac{-Y_F}{W_F \nu_F}, \quad \alpha_0 = \frac{Y_0}{W_0 \nu_0}, \\ \alpha_T &= \frac{C_p(T - T_b)}{q} \end{aligned} \tag{8}$$

증발 및 연소로 인하여 시간에 따라 변화하는 액적의 크기는 아래식으로 표시된다.

$$\frac{da^2}{dt} = - \frac{2\rho D}{\rho_L} \ln(1+B)(1+0.276R_e^{1/2}P_r^{1/3}) \tag{9}$$

2.2. 무차원 방정식

앞에서 유도된 지배방정식들을 무차원화하기 위하여 특성치들로, 초기 액적군의 반경, 액적군 중심에서의 초기 액적의 반경 및 수밀도(number density)등을 사용하였으며, 특성속도 및 특성시간은 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$u^+ = \frac{\alpha}{R_s}, \quad t^+ = \frac{R_s}{u^+} \tag{10}$$

이때 α 는 열확산계수(thermal diffusivity), R_s 는 초기 액적군의 반경이다.

위의 특성치들과 Lewis 수 1을 사용하여 무차원화한 지배방정식들은 아래와 같다.

$$\frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^2 u) = GN \zeta f \quad (11)$$

$$\frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^2 u \alpha_i) = \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta^2 \frac{\partial \alpha_i}{\partial \eta} \right) - \frac{GN \zeta f}{W_F \nu_F} \quad (12)$$

($i=0$; 산소, $i=F$; 연료)

$$\frac{\partial \alpha_T}{\partial \tau} + \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^2 u \alpha_T) = \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta^2 \frac{\partial \alpha_T}{\partial \eta} \right) - GN \zeta f \left(\frac{L}{q} - \frac{b}{W_F \nu_F} \right) + \frac{CR_s}{W_F \nu_F \delta^2} \int_0^\delta GN \zeta f \eta^2 d\eta \quad (13)$$

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = -Kf \quad (14)$$

이때 f 와 G 는 비증발율함수(specific burning rate function)와 집단연소수(group combustion number)로 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁴⁾

$$f = \ln \left\{ 1.0 + \frac{q}{L} (\alpha_T + \alpha_0) \right\} \quad (15)$$

$$G = \left(\frac{4\pi N_{ci} k a_{ci} R_i^2}{\rho DC_p} \right) (1 + 0.276 R_e^{1/2} P_r^{1/3}) \quad (16)$$

또한 δ 는 액적군 중심에서 부터 외피화염까지의 거리를 무차원화한 것이며, K 는 Damkohler 수로 다음식과 같다.

$$K = \frac{2\rho R_i^2}{a_{ci}^2 \rho_L} (1.0 + 0.276 R_e^{1/2} P_r^{1/3}) \quad (17)$$

2.3. 초기, 경계 및 계면조건

일반적으로 비정상상태 문제의 초기조건은 실제경우를 측정 사용하는 것이 보통이나, 본 해석에서는 액적의 수밀도와 크기를 초기조건으로 해서, 이 액적 분포에 대한 정상상태의 해를 구하여 온도, 속도, 각 성분의 질량분포 및 화염의 위치에 대한 초기값들로 사용하였다.

본 모델의 축대칭 구좌표에서의 경계 및 계면조건들은 다음과 같다. 액적군 중심에서는 축대칭으로 부터,

$$\tau \geq 0, \eta = 0 \text{ 때} \\ u = 0, \frac{\partial \beta}{\partial \eta} = 0 \quad (18)$$

계면인 외피화염에서는,

$$\tau \geq 0, \eta = \delta(\tau) \text{ 때} \\ \beta|_+ = \beta|_-, \frac{\partial \alpha_F}{\partial \eta}|_- = \frac{\partial \alpha_0}{\partial \eta}|_+ \quad (19)$$

여기에서 + 와 - 는 외피화염을 계면으로 하여 외부와 내부쪽을 표시하며, 시간에 따른 외피화염의 위치 δ 는 조건 (15)를 만족하는 위치를 구하는 특성치문제(characteristic value problem)로 해석한다. 또한 액적군의 외부, 멀리 떨어진 위치에서는,

$$\tau \geq 0, \eta = \infty \text{ 때} \\ \alpha_T = \alpha_{T\infty}, \alpha_0 = \alpha_{0\infty}, \alpha_F = 0 \quad (20)$$

이때 $\alpha_{T\infty}$ 와 $\alpha_{0\infty}$ 는 일정한 값을 주었다.

2.4. 해석방법

앞에서 유도한 무차원화된 지배방정식들을 초기, 계면 및 경계조건과 함께 풀기 위하여, 연속방정식과 액적의 크기 변화는 수치적분방법으로, 성분보존방정식들은 discrete element 방법을 power law scheme 과 함께 사용 수치해석했으며, 에너지방정식은 시간에 대해서는 Crank-Nicolson 방법을, 거리에 대하여는 성분보존방정식들에 사용한 방법을 이용한 implicit method 로 수치해석하여 각 점에서의 분포상태를 계산하였다. 특성치 문제인 외피화염의 위치결정은 격자점의 교정으로 인하여 trial and error 방법을 사용하여 계면조건을 만족하는 위치를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치적인 해를 얻기 위하여 연료로는 *n*-Butylbenzene($C_{10}H_{14}$)을, 산소의 공급원으로 공기를 사용하였으며, 이 때 사용한 물리-화학적인 값들은, $W_F = 134.21 \text{g/mole}$, $W_0 = 32.0 \text{g/mole}$, $q = 85 \text{kcal/mole}$, $\rho_L = 0.81 \text{g/cm}^3$, $L = 117 \text{cal/g}$, $T_b = 456 \text{K}$, $\rho = 0.2355 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$, $k = 0.22 \times 10^{-3} \text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{K}$, $C_p = 0.33 \text{cal/gK}$, $\mu = 0.467 \times 10^{-3} \text{g/cm} \cdot \text{sec}$ 와 $P_r = 0.7005$ 들이다. 액적군의 초기 액적들의 분포상태에 따른 연소상태, 화염의 성질 및 연소시간을 고찰하기 위하여, 초기 액적들의 반경, 수밀도와 액적군의 반경을 변화 조합시켜 수치해를 구한 결과는 다음과 같다.

3.1. 연소시간

연소시간을 주어진 액적군의 초기상태로 부터 액적군내의 액적들이 완전히 소멸할때까지의 시간으로 정의하였다. Fig. 2 는 주어진 초기 액적군의 반경과 수밀도에서 초기 액적들의 크기가 무차원화된 연소시간에 미치는 영향을 도시한 것으로 초기액적의 크기가 클수록 연소시간은 급격히 증가한다. 이는 단일액적의 연소시간이 초기 액적크기의 제곱에 비례하는 d^2 법칙과 비슷한 경향을 갖고 있으며, 액적군의 연소시간은 액적군내의 단일액적들의 크기에 크게 영향을 받을 수 있다.

Fig. 3 은 액적군의 수밀도가 연소시간에 미치는 영향을 보여주는 것으로, 액적들의 수밀도가 증가할수록

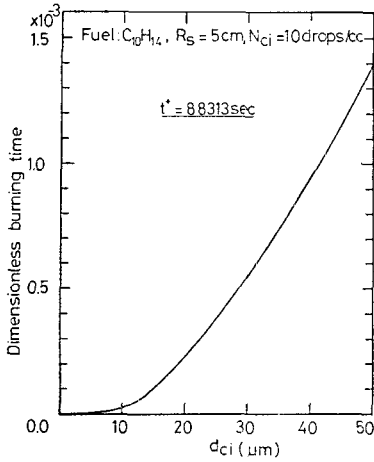


Fig. 2 Effect of initial droplet diameter on the dimensionless burning time

즉 액적들의 분포상태가 조밀할수록 증발시간이 길어져 같은 액적의 크기에서도 연소시간은 서서히 증가됨을 알 수 있다. 또한 액적군내의 초기 액적들의 크기가 클수록 단위부피당 액적들이 차지하는 부피가 커지고, 이로 인하여 증발율은 저하하며, 연소시간의 증가는 커짐을 볼 수 있다. 이는 조밀한 즉 액적의 크기가 커지면 증발율에 대한 수밀도의 영향이 커지고, 액적의 크기가 작은 경우, 즉 덜 조밀한 분포를 갖는 액적군일수록 수밀도에 의한 영향보다는 액적들 크기의 영향이 큼을 알 수 있다.

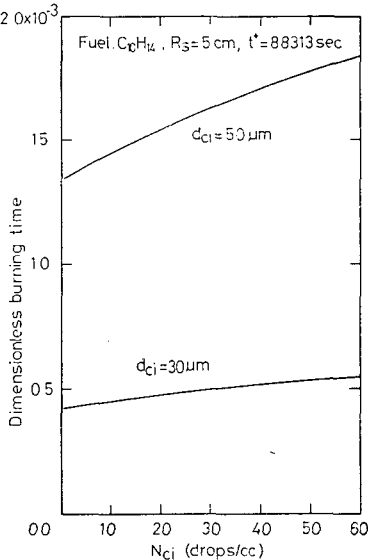


Fig. 3 Effect of initial number density of droplets on the dimensionless burning time

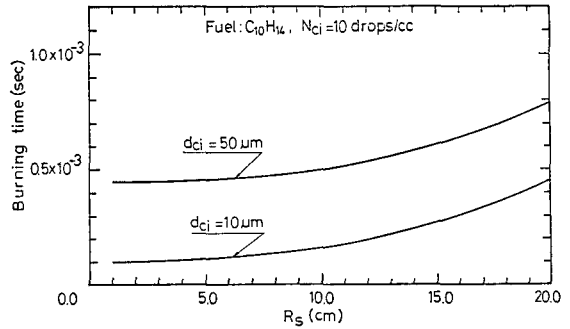


Fig. 4 Effect of initial radius of droplets cloud on the burning time

Fig. 4는 초기 액적군의 반경이 연소시간에 미치는 영향을 보여주는 것으로 액적군의 크기가 커지면 연소시간도 증가한다. 이상 Fig. 2, Fig. 3와 Fig. 4를 종합하여 볼 때, 액적군의 크기, 액적들의 크기 및 수밀도가 증가할수록 연소시간은 길어지며, 액적들의 크기가 액적군의 크기나 수밀도보다 연소시간에 보다 큰 영향을 미치며, 액적들의 분포가 조밀할수록 연소시간에 대한 수밀도 및 액적군 반경의 영향이 커짐을 알 수 있다. 즉 액적군의 연소는 군 내부에 분포된 액적의 증발 및 연소특성에 크게 영향을 받는다.

3.2. 연소특성

Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 7 등은 액적군이 연소할 때 시간에 따른 연소특성의 변화를 규명하기 위하여, 외피 화염과 액적군의 크기의 변화를 3가지 서로 다른 초기 액적들의 분포를 갖는 액적군을 선정 도시한 것이다. Fig. 5는 액적군이 외부집단연소상태로만 연소하다 연소를 완료하는 경우이고, Fig. 7은 연소시작후의 피화염이 액적군 내부로 침투하여 내부집단연소상태로

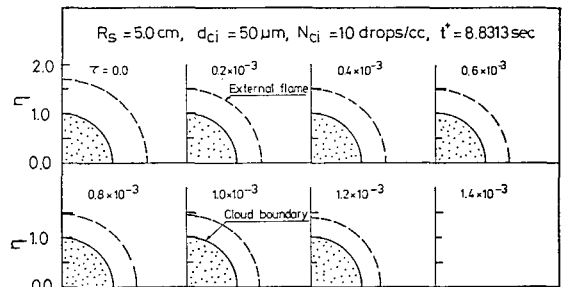


Fig. 5 Variation of combustion mode during cloud life time ($G=7.8540$)

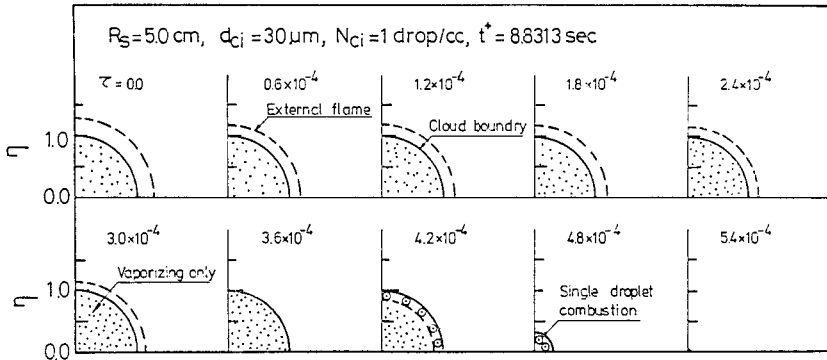


Fig. 6 Variation of combustion mode during cloud life time ($G=0.4712$)

연소하다 단일액적연소상태에서 연소를 완료하는 경우이고, Fig.6은 두 연소상태의 중간 경우이다. Fig.5의 경우는 액적들의 분포가 제일 조밀한 경우 즉 집단연소수가 약 8.0으로 제일 큰 경우이다. 이때 외피화염은 액적군 내의 많은 증발량과 액적의 조밀한 분포로 인하여 액적군 내부로의 산소의 침투가 어려워져 연소시간동안 외부집단연소상태만으로 연소함을 보여준다.

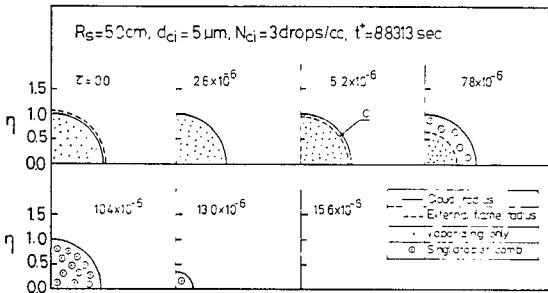


Fig. 7 Variation of combustion mode during cloud life time ($G=0.2356$)

세 경우중 집단연소수가 약 0.2로 제일 적은 Fig.7의 경우, 연소가 시작된 후 산소는 액적들의 분포가 희박함으로 인하여 액적군 내부로 침투 내부집단연소로 연소한 후, 증발량의 감소로 산소는 액적군 중심부까지 침투 단일액적연소로 연소하며, 집단연소수가 약 0.5의 경우인 Fig.6의 경우는 외부집단연소기간이 집단연소수가 적은 경우보다 긴, 위의 두 경우의 중간상태를 유지하며 연소됨을 알 수 있다. 이 집단연소현상들은 Chiu et al^(4,8)의 정상상태하의 연소현상 결과와 일치한다. 이들 연소현상 및 외피화염과 액적군의 수축과정을 고찰하기 위하여, 연소가 진행되는 동안 액적군

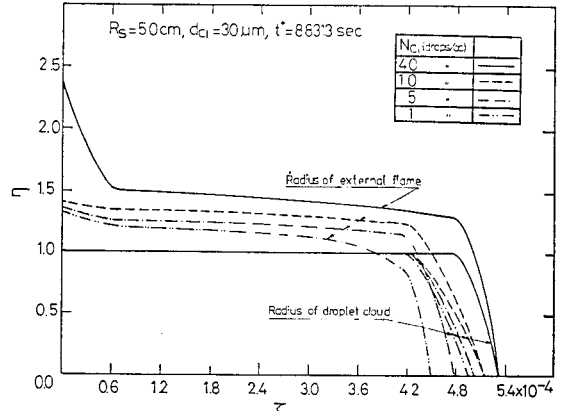


Fig. 8 Radius variations of external envelope flame and droplets cloud during cloud life time

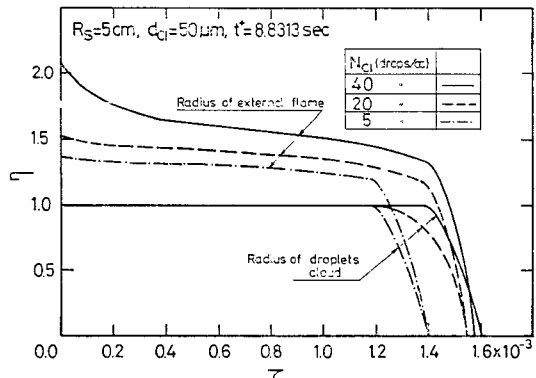


Fig. 9 Radius variations of external envelope flame and droplets cloud during cloud life time

의 반경 및 외피화염반경의 수축과정을 Fig.8과 Fig.9에 도시하였다.

이들에서는 액적군의 반경은 주된 연소시간동안 내부의 액적들의 크기는 변화하더라도 일정하게 유지되

다 연소종료시간 가까이서 갑자기 축소되어 소멸되며 외피화염 또한 주된 연소시간동안은 서서히 감소하다 연소종료 가까이서 액적군 내부로 침투 또는 액적군과 함께 수축되어 연소가 완료됨을 보여준다. 이 현상들은 액적군의 연소특성으로 보여지며, 단일액적연소시의 d^2 법칙에 준하는 결과들과^(15,16) 다른 연소형태를 이룸을 알 수 있다.

3.3. 화염의 성질

Fig. 10은 집단연소수가 7.8540 일 때의 특정시점에서 화염의 구조를 도시한 것이다.

초기에 일정한 크기로 분포된 액적들은 시간이 지남으로 액적군 경계면 가까이에 있는 액적들이 더 많이 증발, 크기가 중심부보다 적어졌으며, 증발로 인한 기체의 속도는 중심부에서 부터 급격히 증가하다 액적

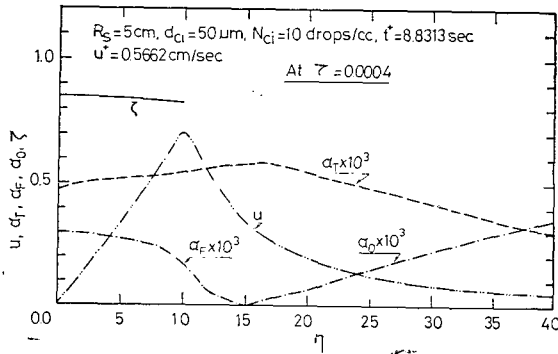


Fig. 10 Structure of a droplets cloud combustion flame

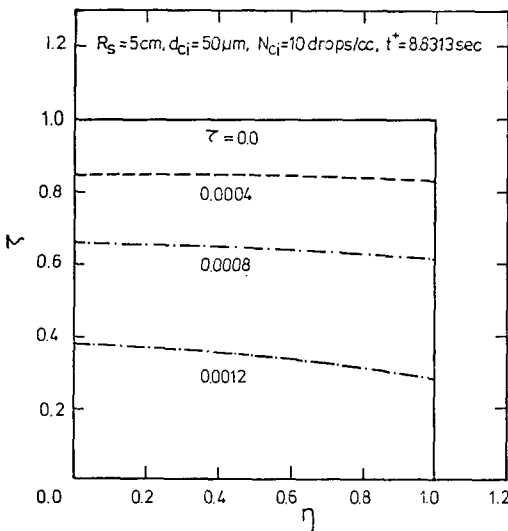


Fig. 11 Variation of droplet radius distribution during group combustion of droplets cloud

군 경계를 지난 후 감소함을 볼 수 있다. 또한 기체화된 연료는 액적군 중심부에서 최대치를 갖고 외부쪽으로 감에 따라 서서히 감소하다 액적군 경계를 지난 후 급격히 감소하여 외피화염에서 소멸되는 외부집단연소를 이루며, 산소는 외부쪽으로 감에 따라 증가된다. 온도는 액적들이 증발할 때의 열소열로 인하여 중심부에서 낮은 온도를 갖고, 외부쪽으로 증가하다, 외피화염에서 연소열로 인하여 최대온도를 유지한 후, 외부쪽으로 감소됨을 보여준다. 이 화염의 성질은 정상상태하의 화염의 성질과^(1,3,11,12) 경향이 일치한다.

Fig. 11에서 Fig. 14까지는 위의 집단연소수를 갖는 액적군이 연소할 때 시간에 따른 액적의 반경, 기체속도, 산소 및 연료의 질량분포와 온도분포의 변화를 도시한 것이다.

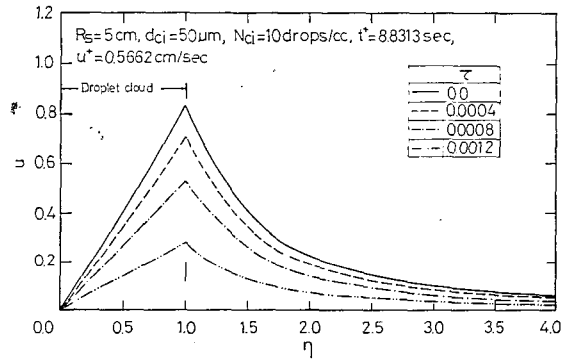


Fig. 12 Variation of velocity distribution during group combustion of droplets cloud

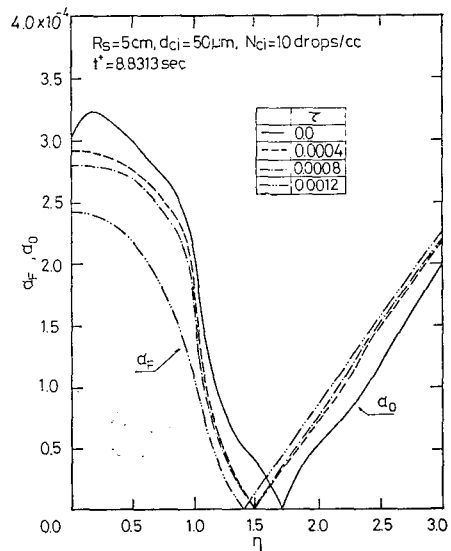


Fig. 13 Variation of mass concentrations during group combustion of droplets cloud

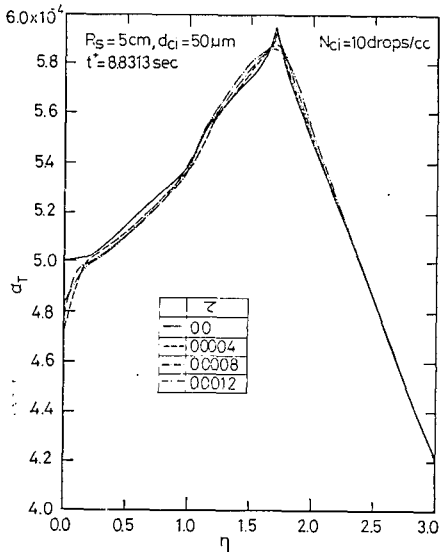


Fig. 14 Variation of temperature profile during group combustion of droplets cloud

Fig. 11에서는 초기에 일정한 크기를 갖는 액적들은 시간이 지남에 따라 크기가 감소하며, 액적군 외부쪽이 내부쪽보다 액적반경의 감소율이 큼을 보여준다. 이 현상은 액적의 증발율이 외피화염에서의 열전달로 인하여 내부쪽보다는 액적군 경계쪽이 큰것에 기인된다고 해석된다. Fig. 12는 시간에 따른 기체속도분포의 변화를 도시한 것으로, 시간이 지남에 따라 외부로 전파되는 속도는 감소됨을 볼 수 있으며, 이는 액적의 크기가 감소, 증발량이 감소함으로 외부로 전파되는 확산강도가 감소하였음으로 해석된다. 산소와 연료의 질량분포는, 시간이 지남에 따라 증발량의 감소로 인하여 연료의 농도는 적어지며, 산소는 액적군 내부로 침투, 산소의 농도는 증가함을 Fig. 13에서 보여주고 있다. 이 때 초기상태의 연료농도가 액적군 중심부가 외부쪽보다 약간 낮은것은 조밀한 액적군의 분포 및 온도의 영향으로 증발이 활발치 못하다가 시간이 갈수록 증발이 이루어져 서서히 중심부의 연료농도가 최대점으로 회복되는 것으로 해석된다. Fig. 14는 시간에 따른 온도분포의 변화를 도시한 것으로 초기의 중심부 온도가 그후보다 높은것은 Fig. 13의 증발량과 관계되는 현상, 즉 초기에 활발하지 못한 증발로 증발 잠열은 적게 요구되며 이로 인하여 중심부의 온도가 그후 보다 약간 높음을 보여주는 것으로 풀이되며, 시간의 지남에 따라 중심온도는 최소점으로 부터 서서히 회복됨을 보여 준다. 또한 시간이 지남에 따라 외피화

염 주위의 온도는 열소열의 영향으로 완만하여지며, 연소기간동안 대체적인 온도분포는 거의 일정한 것은 연소시간이 매우 짧아서 연소기간 동안 열이 전달되는 범위가 적음으로 해석된다.

4. 결 론

구의 형상을 갖는 액적군이 연소할 때의 시간에 따른 연소 및 화염의 특성을 이론적으로 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액적군의 연소는 초기 액적의 수밀도, 액적들의 크기 및 액적군의 반경이 클수록 연소시간은 길어지며, 연소시간은 액적들의 크기에 크게 영향을 받는다.

(2) 액적군의 연소는 초기 분포상태가 희박할수록 초기 액적들의 크기가 큰 영향을 미치며, 조밀할수록 수밀도 및 액적군 반경의 영향들이 커진다.

(3) 액적군의 연소상태는 초기 분포가 조밀할수록 외피화염연소상태가 주종을 이루며, 희박할수록 내부집단연소나 단일액적연소상태로 친이된다.

(4) 액적군의 크기 및 외피화염의 크기는 주된 연소기간동안 거의 일정하다가 연소종료 가까에서 갑자기 수축 연소를 완료한다.

(5) 액적군의 연소시간이 열전달속도에 비하여 매우 짧음(10^{-3} 의 order 차)으로 외피화염에서의 열전달 범위는 외피화염주위에 국한되며, 연소기간동안 온도의 변화는 크지 않다.

끝으로 액적군의 비정상 상태연소를 보다 체계적으로 규명하기 위하여는 이론적으로는 실제연소기에 대한 자료의 도입, 유한 화학반응모델의 채택, 액적의 증발 및 점화특성의 첨가등이 필요하며, 체계적인 실험적연구 또한 요망된다.

후 기

본 연구는 1983년도 문교부 학술연구조성비의 지원으로 수행된 것이며, 이에 대하여 많은 감사의 뜻을 표한다.

References

- (1) Chiu, H.H. and Liu, T.M., "Group Combustion of Liquid Droplets", Comb. Sci. and Tech. 17, 1977
- (2) Kim, H.Y. and Chiu, H.H. "Group Combustion

- of Liquid fuel Sprays", AIAA 21st Aerospace Science Meeting, AIAA-83-0150, 1983
- (3) Chiu, H.H., Kim, H.Y. and Groke, E.J., "Internal Group Combustion of Liquid Droplets", 19th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1982
- (4) Chiu, H.H., Ahluwalia, R.K., Koh, B. and Groke, E.J., "Spray Group Combustion", AIAA 16th Aerospace Meeting, AIAA-78-75, 1978
- (5) Labowsky, M. and Rosner, D.E., "Group Combustion of Droplets in Fuel Cloud I. Quasi-Steady Prediction", Advances in Chemistry Series, 166 1978
- (6) Labowsky, M., "Burning Rates of Linear Fuel Droplet Arrays", ASME Winter Annual Meeting, ASME 80-WA/HT-34, 1980
- (7) Labowsky, M., "Calculation of the Burning Rates of Interacting Fuel Droplets", Comb. Sci. and Tech., 22, 1980
- (8) Styles, A.C. and Chigier, N.A., "Combustion of Air Blast Atomized Spray Flames", 16th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1976
- (9) Chigier, N.A., "The Atomization and Burning of Liquid Fuel Sprays", Prog. Energy Comb. Sci. Vol. 2, 1976
- (10) Chigier N.A., "Group Combustion Models and Laser Diagnostic Methods in Sprays: A Review", Comb. and Flame, Vol. 51, No. 2, 1983
- (11) Onuma, Y., Ogasawa, M. and Inue, T., "Further Experiments on the Structure of a Spray Combustion Flame", 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1976
- (12) Onuma, Y. and Ogasawa, M., "Studies on the Structure of a Spray Combustion Flame", 15th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1974
- (13) Umemura, A., Ogawa, S. and Oshima, N., "Analysis of the Interaction Between two Burning Droplets", Comb. and Flame, 41, 1981
- (14) Twardus, E.M. and Brzustowski, T.A., "An Experimental Study of Flame Spread and Burning in Arrays of Monosize Hydrocarbon Droplets", Comb. Sci. and Tech. 17, 1978
- (15) Isoda, H. and Kumagai, S., "New Aspects of Droplet Combustion", 7th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1959
- (16) Waldman, C.H., "Theory of Non-Steady State Droplet Combustion", 15th Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute, 1974
- (17) Botros, P., Law, C.K. and Sirignano, W.A., "Droplet Combustion in a Reactive Environment", Comb. Sci. and Tech. 21, 1980
- (18) Sangiovanni J.J., "A Model for the Nonsteady Ignition and Combustion of a Fuel Droplet", Advances in Chemistry Series 166, 1978
- (19) Correa, S.M. and Sichel, M., "The Group Combustion of a Spherical Cloud of Monodisperse Fuel Droplets", 19th Symposium (international) on Combustion, The Combustion, The Combustion Institute, 1982
- (20) Bellan, J. and Summerfield, M., "Theoretical Examination of Assumptions Commonly Used for the Gas Phase Surrounding a Burning Droplet", Comb. and Flame, 33, 1978