

< 論 文 >

비균일 액적분포가 액적군의 집단연소 특성에 미치는 영향

김 호 영* · 전 철 균**

(1987년 3월 2일 접수)

The Effects of Non-Uniform Droplets Distribution on the Characteristics of Group Combustion for Liquid Fuel Droplets Cloud

Ho Young Kim and Chul Kyeun Chun

Key Words: Group Combustion(집 단연소), Non-Uniform Droplet Size Distribution(비균일액적 크기분포), Non-Uniform Number Density Distribution(비균일수밀도분포), Envelope Flame(외피화염)

Abstract

In order to predict the effects of droplets distributions such as number density and droplets size on group combustion characteristics and flame structure for liquid fuel sprays, modifications of group combustions model were made by changing the droplets distributions from uniform to non-uniform. Various droplets distribution models were adopted in this analysis to examine the effect of number density distribution on combustion characteristics and the difference between uniform and non-uniform droplets size distributions for a spherical droplets cloud.

As results of present study, hollow droplets cloud with outer concentrating distribution has shorter total combustion time compare with the case of solid droplets cloud with inner concentrating distribution. Uniform droplets size distribution model predicts the shorter total combustion time compare with non-uniform droplets size distribution model, and the uniform droplets size distribution model may be used to predict the total combustion time for the droplets cloud containing larger initial size of droplets.

기 호 설 명

B : 질량전달수

C_p : 기체상의 정압비열

D : 가스의 확산계수

H : z 보다 큰 직경의 액적수밀도

k : 기체상의 열전도계수

L : 연료의 증발잠열

N_j : j 구간의 무차원 수밀도

n_i : 액적군내 단위부피당 총 수밀도

q : 연료의 연소열

R : 액적의 반경

\bar{R}_j : j 구간 평균액적반경

R_m : 액적군의 평균액적반경

T_b : 연료의 비등온도

u : 무차원 반경방향 속도

W_i : i 성분의 분자량

* 정회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 고려대학교 대학원

- Y_i : i 성분의 질량비 (mass fraction)
 z : 액적의 직경
 α_i : ($i=F, O, T$), 연료, 산소 및 온도에 대한 Schvab-Zeldovich 변수, 식 (9) 참조.
 δ_r : 무차원 외피화염의 반경
 δ_i : 무차원 액적군 반경
 ζ_j : j 구간의 무차원 액적 반경
 η : 무차원 반경방향좌표
 μ : 기체상의 점성계수
 ν_i : i 성분의 Stoichiometric 계수
 ρ : 기체상의 밀도
 ρ_l : 액체상의 밀도
 τ : 무차원 시간

참 자

- F : 연료
 O : 산소
 T : 온도

1. 서 론

액체연료의 대부분은 분사연소의 형태로 연소되며, 분사연소기의 효율개선, 적절한 운전조건의 확립 및 새로운 분사연소기의 개발등은 액적군의 연소특성과 화염의 구조에 대한 명확한 이해가 선행됨으로 이룰 수 있다. 현재 분사연소에 대한 해석은 집단연소(group combustion)라는 개념 즉 액적군내의 총연소기간동안 액적들은 각각이 독립적으로 연소되는 것이 아니라 액적군내의 액적들이 조밀하게 분포되어 있는 경우는 액적군자체가 큰 단일액적과 같이 집단적으로 연소하며 희박하게 분포된 경우 또는 연소종료 가까이에서는 독립적으로 연소한다는 개념으로 설명되고 있다⁽¹⁻⁶⁾.

현재까지 액체연료 액적군의 집단연소에 관한 연구들로는 정지된 구형 액적군에 대한 Chiu 그룹의 연구들과^(2,3) 이를 기본으로 한 김의 비정상집단연소에 관한 연구⁽⁷⁾, 액적들간의 상호작용에 관한 연구들로서 2개, 3개 또는 그 이상의 액적들이 규칙적으로 배열된 경우의 연소에 관한 Umemura⁽⁸⁾, Labowsky 그룹에 의한 연구^(5,6,9)들이 있다. 위의 연구들은 액적군내의 액적들이 균일한 크기 및 수밀도분포를 갖는 경우에 대한 것들로서 실제의 분무에 존재하는 비균일 크기분포 (non-uniform droplet size distribution)와 위치에 따른 수밀도(number density)의 분포상태가 고려되지 않음으로서 실제상태의 액적군에 대한 집단연소현상을 규명하기는 불충분한 실정이다. 또한 액적들의 분포상

태를 고려한 연구들로는 Choudhury 와 Gerstein 의 액적의 크기분포를 고려한 연구와⁽¹⁰⁾ Tambour 의 평균위의 유동시 증발에 관한 연구⁽¹¹⁾ 등이 있으나 액적들의 크기 및 수밀도 분포들을 고려하여 집단연소현상을 해석한 연구들은 없는 실정이다.

본 연구에서는 액적들의 분포상태가 집단연소의 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 김의 비정상 집단연소모델에⁽⁷⁾ 비균일 액적크기분포와 수밀도분포를 고려한 비균일분포 집단연소모델을 구성하여 이론적으로 해석하였다.

2. 이론해석

본 연구에서는 Chiu^(1,2) 및 김⁽⁷⁾의 연구에서 채택한 구형(球形)액적군에 액적들의 크기가 여러 종류로 분포됨은 물론 위치에 따라 액적들의 수밀도가 변화하는 비균일 액적분포를 갖는 액적군을 해석의 대상으로 하였다. 이때 액적군내의 액적들의 크기분포함수는 일반적으로 다음 식으로 표현된다⁽¹²⁾.

$$\frac{dH}{dZ} = P_1 Z^{P_2} \exp(-P_3 Z^{P_4}) \quad (1)$$

이때 P_1, P_2, P_3 와 P_4 는 실험치를 함수형태로 나타낼때에 얻어지는 상수들이며 본 해석에서는 참고문헌 (12)의 분포함수형태를 택한후 액적들의 크기에 따라 적절한 상수들을 결정하였다. 또한 위치에 따른 수밀도 분포함수는 다음식을 사용하였다.

$$F(r) = C_1 r^2 + C_2 r + C_3 \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 Fig. 1에 나타난 것과 같은 12가지의 분포모델들을 해석대상으로 하였으며, 비교를 위하여 각각의 액적군내의 연료량은 같게하여 상수들을 구하여 사용하였다. 이때 중공형(中空形: hollow type) 액적군의 중공영역은 액적군 반경의 1/2을 반경으로 하는 동심구로 하였으며, 각 분포들중 최대수밀도가 액적군의 중심쪽에 있는 액적군들(SPD, SLD, HPD, HLD)

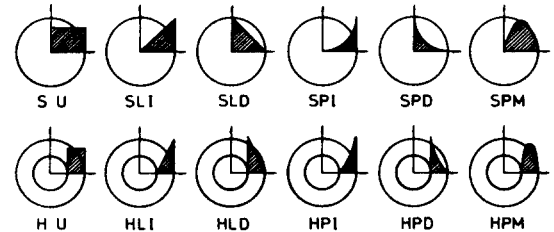


Fig. 1 Various number density distribution models (S: solid, H: hollow, U: uniform, L: linear, P: parabolic M: mountain, I: increasing, D: decreasing)

을 내부집중형, 최대수밀도가 액적군의 외부경계면에 존재하는 액적군들(SPI, SLI, HPI, HLI)을 외부집중형이라 정의하며, 최대수밀도가 중간에 있는 액적군들(SPM, HPM)을 중간집중형이라 정의한다. 또한 액적군의 수밀도분포를 수치계산에 사용하기 위하여 전체 구간을 수개의 소구간으로 분할한 후 각각의 소구간에서 평균액적반경 및 구간액적수밀도를 구하여 전체분포를 구간들의 평균액적분포들의 집합으로 대체시켰다. 평균반경은 부피평균반경(volumetric mean radius)을 사용하였으며 계산식들은 다음과 같다.

$$n_i = \int_{R_{i-1}}^{R_i} \left(\frac{dH}{dR} \right) dR \quad (3)$$

$$\bar{R}_i = \left[\int_{R_{i-1}}^{R_i} R^3 \left(\frac{dH}{dR} \right) \frac{dR}{n_i} \right]^{1/3} \quad (4)$$

본 해석에서는 편의를 위하여 액적들은 구의 형상이며 온도는 연료의 비등온도이고 Lewis 수는 1로 가정하였으며, 연료와 산소간의 발열화학반응은 1단계 반응이며 반응열은 확산열에 비하여 매우 크다는 확산화염모형을 택하였다. 이로부터 액적군내부에 생성되는 기체화된 연료는 외피화염 내부 또는 외부에 축적되지 못하며 증발과 동시에 연소되는 즉 단일액적연소 해석의 경우와 같은 준정상 상태(quasi-steady state)를 이루므로 성분보존방정식의 비정상항은 생략된다.

위의 가정들을 이용 축대칭 좌표에서의 무차원화된 지배방정식들은 다음과 같다.

○ 연속방정식

$$\frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^2 u) = G\theta \quad (5)$$

$$\theta = \sum_{i=1}^n F(\eta) f N_i \zeta_i$$

$$f = \ln \left\{ 1 + \frac{q}{L} (\alpha_r + b\alpha_o) \right\}$$

($b=0$: 증발시, $b=1$: 단일액적연소시)

○ 성분보존방정식

$$\frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^2 u \beta) = \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta^2 \frac{\partial \beta}{\partial \eta} \right) - \frac{G\theta}{W_{F\nu_F}} \quad (6)$$

$$\beta = \alpha_o - \alpha_F$$

○ 에너지방정식

$$\frac{\partial \alpha_r}{\partial \tau} + \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^2 u \alpha_r) = \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\eta^2 \frac{\partial \alpha_r}{\partial \eta} \right) - G\theta \left(\frac{L}{q} - \frac{b}{W_{F\nu_F}} \right) \quad (7)$$

식(7)의 생성소멸항은 성분보존방정식에서 외피화염의 위치 δ_f 가 정하여짐으로 증발만 있는 경우 즉 $\eta < \delta_f$ 인 구간에서는 $b=0$ 이고 단일액적연소상태인 구간 즉 $\eta > \delta_f$ 에서는 $b=1$ 이 되는 것을 전산프로그램에서 고

려한다. 또한 액적이 존재하지 않는 구간 즉 증공영역 또는 액적군 외부의 분포상태는 수밀도 분포함수 $F(\eta)$ 에서 고려된다.

○ 액적반경변화식

$$\frac{d}{d\tau} (\zeta_i^2) = -Kf \quad (8)$$

윗식들의 유도과정에서 성분보존방정식 및 에너지방정식들에 사용된 Schvab-Zeldovich 변수들은 다음과 같다.

$$\alpha_F = \frac{Y_F}{W_{F\nu_F}}, \quad \alpha_o = \frac{Y_o}{W_o\nu_o}, \quad \alpha_r = \frac{C_p(T - T_b)}{q} \quad (9)$$

또한 무차원화 과정에서 사용된 무차원 특성치들은 특성길이라는 액적군의 반경을, 구간 액적반경에 대하여는 전체평균액적반경을, 구간 수밀도에 대하여는 총액적수밀도를 사용하였으며 속도 및 시간에 대한 특성치들은 다음과 같이 정의하였다.

$$\nu^* = \frac{\alpha}{r_s} = \frac{k}{\rho C_p r_s}, \quad t^* = \frac{\rho C_p r_s^2}{k}$$

또한 무차원수 G 와 K 는 제 1종 집단연소수(1st kind group combustion number)^(1,2,7)와 일종의 Damköhler 수이며 다음 식들로 정의된다.

$$G = \frac{4\pi n_i k R_n r_s^2}{\rho C_p D} (1 + 0.276 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (10)$$

$$K = \frac{2\rho r_s^2}{R_n^2 \rho_i} (1 + 0.276 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (11)$$

위의 지배방정식들을 해석하기 위한 경계, 제면 및 초기조건들은 다음과 같다.

즉, 축대칭으로부터 액적군 중심에서는,

$$\tau \geq 0, \quad \eta = 0 \text{ 때} \\ u = 0, \quad \frac{\partial \beta}{\partial \eta} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_r}{\partial \eta} = 0 \quad (12)$$

외피화염면에서의 제면조건은,

$$\tau \geq 0, \quad \eta = \delta_f(\tau) \text{ 때} \\ \beta = 0, \quad \frac{\partial \alpha_o}{\partial \eta} = \frac{\partial \alpha_F}{\partial \eta}, \\ \frac{\partial \alpha_r}{\partial \eta} \Big|_+ - \frac{\partial \alpha_r}{\partial \eta} \Big|_- = \frac{1}{W_{F\nu_F} \delta_f^2} \int_0^{\delta_f} G\theta \eta^2 d\eta \quad (13)$$

이때 +는 외피화염 외부면, -는 내부면을 나타내며, 액적군의 외부 멀리 떨어진 위치에서는,

$$\tau \geq 0, \quad \eta = \infty \text{ 때} \\ \beta = \alpha_{o,\infty}, \quad \alpha_r = \alpha_{r,\infty} \quad (14)$$

또한 초기조건은 점화시의 조건들로서 점화시기까지의 해를 사용하여야 하나 본 해석에서는 초기액적분포시의 정상상태하의 해를 구하여 사용하였다.

위의 지배방정식들의 해를 얻기 위하여 액적수밀도 분포 및 액적반경들의 계산에는 소구간의 갯수를 20

개⁽¹³⁾로 하고 각각의 소구간을 100 등분한후 수치적분 방법을 사용하였으며, 성분보존방정식 및 에너지방정식의 질량농도 및 온도의 계산에는 반경방향으로는 유한차분법을 시간에 대하여는 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 수치해석하였다. 외피화염의 위치결정은 계면조건을 만족하는 위치를 trial and error 방법을 사용하여 구하였으며, 그 위치에서의 연소로 인한 열량의 생성 및 전달을 식 (13)을 고려함으로 보상하여 주었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 수치해를 얻기 위하여 연료로 *n*-Butylbenzene(C₁₀H₁₄)을, 산소의 공급원으로 공기를 택하였으며 이들의 물리 화학적 성질들은 김⁽⁷⁾의 연구에서 사용한 값들과 동일한 값을 사용하였다. 액적군의 초기분포상태 즉 액적의 평균반경 및 수밀도의 분포를 변화시켜 얻은 수치해의 결과들을 정리하면 다음과 같다.

3.1 수밀도 분포에 따른 연소특성

Fig. 2는 액적군 중심에 액적들이 존재하는 솔리드형(solid type) 액적군들에서 각각의 액적수밀도 분포에 따른 반경방향으로 전달되는 기체의 속도분포를 같은 시간에서($\tau=1 \times 10^{-4}$) 도시한 것으로서 속도는 액적군 중심으로부터 외부쪽으로 진행할수록 증가하다가 최대값을 가진후 감소함을 보여준다. 이때 액적군 내부의 기체속도는 액적들이 액적군 중심쪽으로 조밀하게 분포되어 있는 액적군들 즉 SPD, SLD, SPM, SU, SLI, SPI 액적군 순으로 큰 값을 가지며 최대속도를 갖는 위치도 내부쪽에 나타나며 균일액적분포(SU) 및 액적들이 외부경계쪽으로 조밀한 분포들(SLI, SPI)에서는 액적군의 경계에서 최대값을 나타낸다. 또한 액적군의 경계($\eta=1$)에서의 속도는 외부쪽으로 집중분포된 액적군일수록 큰 값을 나타내나 그 차이는 크지 않다. 즉 액적군 경계에서의 기체속도는 액적군의 총증발율에 비례하므로 외부집중형의 액적군일수록 많은 액적들이 높은 온도의 주위공기에 노출됨으로서 총증발량은 커짐을 알 수 있다.

Fig. 3은 솔리드형 액적군들의 수밀도 분포상태에 따른 연료 및 산소농도와 외피화염(envelope flame)의 위치($\beta=0$)를 동일 시간에서 비교 도시한 것이다. 기체화된 연료농도의 경우 속도분포와 마찬가지로 내부 집중형 액적군일수록 내부쪽의 연료농도는 큰 값을

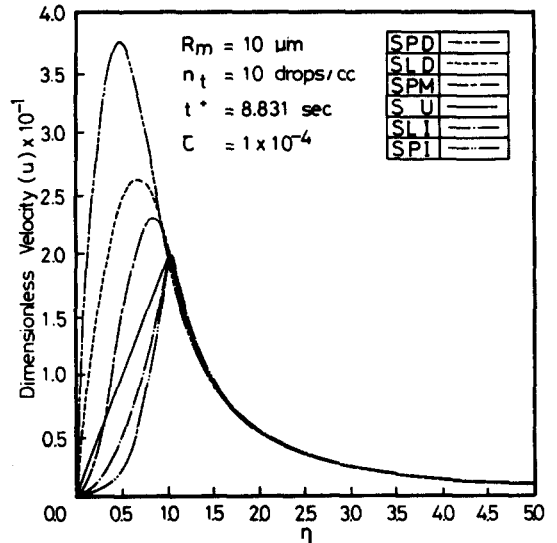


Fig. 2 Velocity distributions for solid type droplets clouds

가지며 외부집중형일수록 액적군 경계 및 외부쪽의 농도가 큰 값을 나타낸다. 또한 외피화염의 위치는 액적군 외부의 연료농도값이 클수록 중심에서 멀리 존재한다. 이는 외부집중형 액적군일수록 연료의 총증발율 및 액적군 외부에서의 속도가 커지고 연료농도 또한

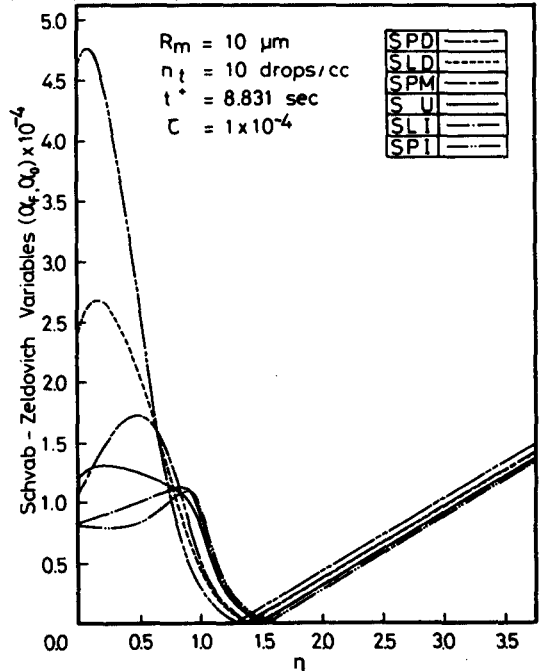


Fig. 3 Mass concentration profiles for solid type droplets clouds

큰 값을 나타내므로 외피화염은 멀리 존재하는 것으로 해석된다. Fig. 2와 Fig. 3은 연소초기 즉 외부집단연소가 행하여지는 시점에서의 증발율로써 Fig. 6에서 Fig. 9의 결과들과 비교 종합하면 연소초기 즉 외부집단연소기간에서는 외부집중형의 총증발율은 크나 내부집단연소 또는 단일액적연소상태로 천이됨에 따라 초기의 많은 증발로 인하여 적은 양의 미연소 액적들이 존재하므로 증발율은 급격히 감소하며 연소를 완료한다.

Fig. 4는 위의 액적군들에 대한 온도분포를 동일시간에서 비교 도시한 것으로서 액적군 중심에서 낮은 온도를 가지며 외부쪽으로 온도가 증가하다가 외피화염면에서 최고온도값을 가진후 감소함을 보여준다. 액적군 중심부의 낮은 온도값은 액적들의 증발에 의한 열소멸의 영향으로, 내부집중형 액적군일수록 중심에서의 열소멸로 인하여 낮은 온도를 나타낸다. 또한 외부집중형 액적군들에서는 액적들의 분포가 조밀한 경계

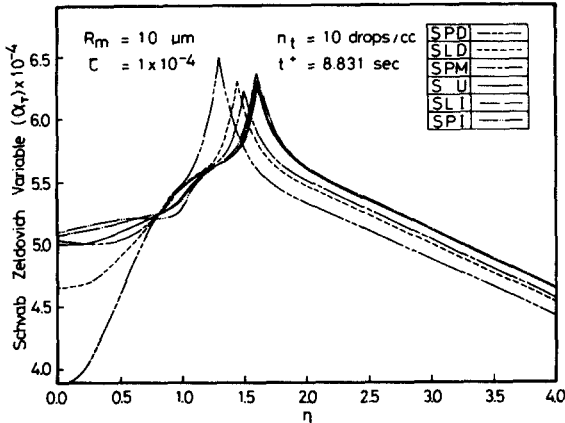


Fig. 4 Temperature distributions for solid type droplets clouds

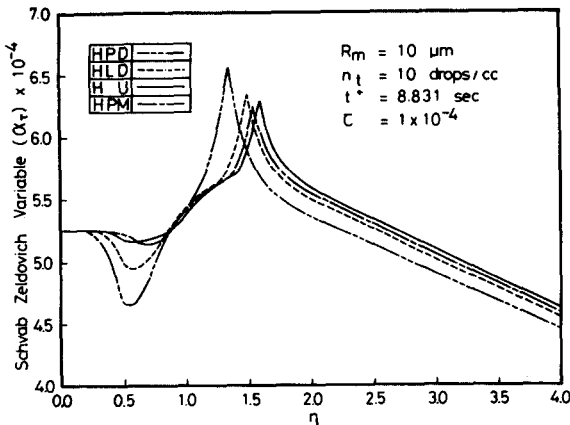


Fig. 5 Temperature profiles for hollow type droplets clouds

부근에서 활발한 증발로 인한 열소멸에 기인하여 온도가 저하됨을 보여준다.

위의 결과들은 액적군 중심부까지 액적들이 존재하는 솔리드형 액적군들에 대한 것들이며, 액적들이 액적군반경의 1/2 되는 지점부터 존재하는 증공형 액적군에 대한 속도와 산소 및 연료의 농도분포들은 액적군이 존재하는 영역에서는 솔리드형 액적군들의 분포상태와 경향이 같다. Fig. 5는 증공형 액적군들의 액적분포상태에 따른 온도분포 및 화염의 위치를 동일시간에서 도시한 것으로 중심부근에서 일정하게 유지되는 온도가 외부쪽으로 감에 따라 액적들이 나타나는 지점 가까이서 낮아지다가 다시 상승하여 외피화염에서 최고온도를 보여준 후 감소함을 보여준다. 또한 내부집중형일수록 액적들이 존재하기 시작하는 지점($\eta = 0.5$)의 온도는 많은 액적들의 증발로 인한 열소멸에 기인되어 낮게 나타나고 외피화염은 외부집중형에 비하여 액적군경계 가까이에 형성된다. 즉 증공형 액적군들도 외부집중형이 내부집중형에 비하여 증발율이 큰을 알 수 있다. 이때 액적군 중심부의 온도가 분포상태의 변화에 따라서도 일정한 것은 Fig. 5가 연소초기 시점의 결과로써 이 시점에서는 액적들의 증발로 인한 열손실에 기인되는 온도의 저하가 액적군 중심쪽으로 전파되는 두께 즉 일종의 열침투 두께(thermal penetration depth)가 액적군 중심까지 침투하지 못함을 의미하며 시간이 경과하면, 열침투 두께는 중심부쪽으로 전파된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 솔리드형과 증공형 액적군들의 여러가지 액적분포들에 대한 시간에 따른 외피화염의 반경변화 및 외부집단연소(external group combustion) 시간과 내부집단연소(internal group combustion) 시간의 합 즉 총집단연소시간을 도시한 것으로서 화염의 반경 δ_r 가 0이 되는 시간이 총집단연소시간이다. 위의 두 경우 외피화염은 연소시작후 크기가 서서히 감소하다가 액적군 내부로 침투를 시작한후 급격히 수축하여 집단연소를 완료하며, 총집단연소기간동안 증발로 인하여 액적들의 크기는 적어지더라도 액적군의 크기는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 바와같이 초기의 크기($\delta_r = 1$)을 유지하고 있으므로 $\delta_r > 1$ 일때는 외부집단연소 상태이고 $\delta_r < 1$ 의 경우는 내부집단연소 상태가 됨을 알 수 있다. 내부집단연소시 외피화염 외부에 존재하는 액적들은 자각이 단일화염을 형성하며 연소하는 단일액적연소 상태가 된다. 또한 내부집중형일수록 외부집중형에 비하여 외부집단연소시간이 짧으며 이 기간동안 작은 크기의 외피화염을 형성하며, 내부집단연소상태로 천이됨에 따라 내부집중형의 경우가 외부집중

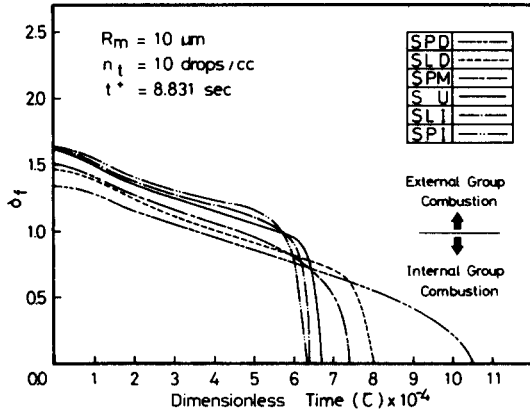


Fig. 6 Radius variation of external envelope flame for solid type droplets clouds

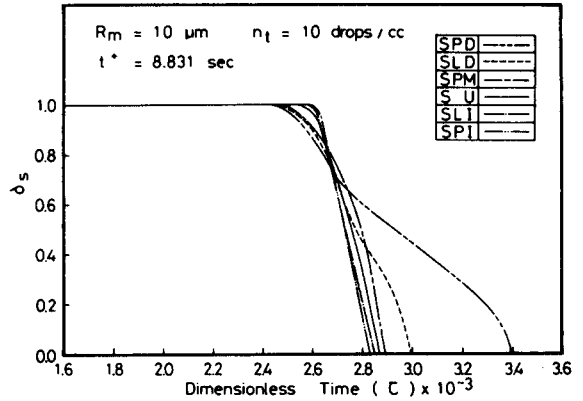


Fig. 8 Radius variation of solid type droplets clouds

형의 경우보다도 내부집단연소기간은 길며 큰 외피화염을 형성한다. 총 집단연소시간은 내부집중형의 경우보다 길게 나타난다. 이는 내부집중형 액적군들의 증발율이 외부집중형보다 작고 내부쪽에 위치한 조밀한 액적들이 증발하여 집단연소에 필요한 기체화연 연료를 공급하는 시간이 길어짐으로 나타나는 현상으로 해석된다. 또한 솔리드형과 중공형 액적군의 집단연소 상태는 정성적으로는 같으나 총연소시간은 중공형이 솔리드형보다 짧으며 수밀도 분포들간의 차이는 적다. 이는 액적들이 존재하지 않는 중심부근에서의 열전달 및 많은 액적들이 외부쪽에 집중되어 높은 온도의 주위 공기에 노출됨으로 생기는 현상으로 해석된다.

솔리드형과 중공형 액적군들에 대한 시간에 따른 액적군의 크기 변화 및 총연소시간 즉 액적군이 완전 소멸하는 시간이 Fig. 8과 Fig. 9에 도시되었다. 액적군의 반경은 주연소시간동안 거의 일정하게 유지되다

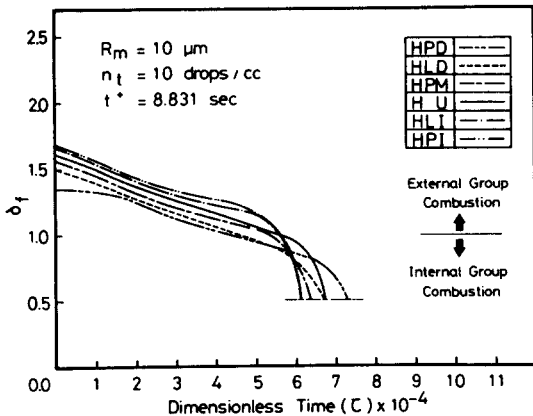


Fig. 7 Radius variation of external envelope flame for hollow type droplets clouds

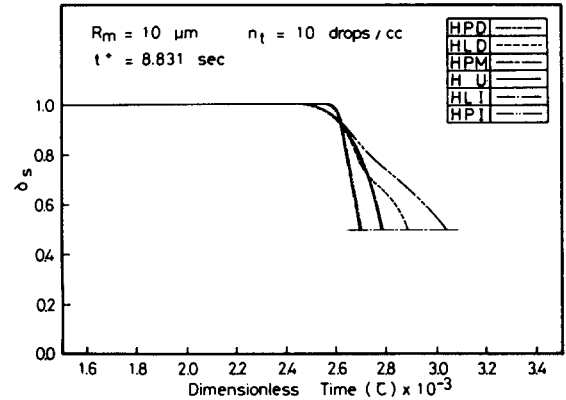


Fig. 9 Radius variation of hollow type droplets clouds

가($\delta_s=1$) 연소 말기에 급격히 수축 연소를 완료하며 내부집중형일수록 액적군의 크기는 일찍 감소하기 시작하고 총연소시간은 길다. 또한 솔리드형 액적군들의 크기는 중공형들에 비하여 일찍 감소하기 시작하지만 총연소시간은 길다. 이는 중공형 액적군들이 초기에는 외부쪽의 조밀한 분포로 인하여 액적군의 수축은 늦게 일어나기 시작한후 내부쪽의 액적들이 존재하는 구간이 작기 때문에 총연소시간은 짧게 되는 것으로 해석된다.

3.2 액적크기 분포에 따른 연소특성

액적들의 크기분포상태를 균일크기분포모델 또는 비균일크기분포모델로 사용하는 경우 두모델간의 차이점을 규명하기 위하여 솔리드형의 균일수밀도분포를 갖는 액적군들에 대하여 해석한 결과들은 다음과 같다. Fig. 10은 각각의 액적분포모델에 대하여 초기의 평균

액적크기가 변화할 때의 액적군의 총연소시간을 도시한 것으로 평균액적크기가 큰 액적군 일수록 총연소시간은 증가한다. 또한 같은 초기 평균액적크기를 갖는 액적군들이라도 비균일액적크기모델을 사용한 경우가 균일액적크기모델의 경우보다 총연소시간이 길게 예측되며 액적크기 변화에 따른 총연소시간의 변화율이 큼을 보여준다. 이는 비균일 액적크기분포모델을 사용할 경우에 평균액적크기보다 큰 액적들이 액적군에 존재함으로 총연소시간이 길어지며 변화율 또한 커지는 것으로 해석된다.

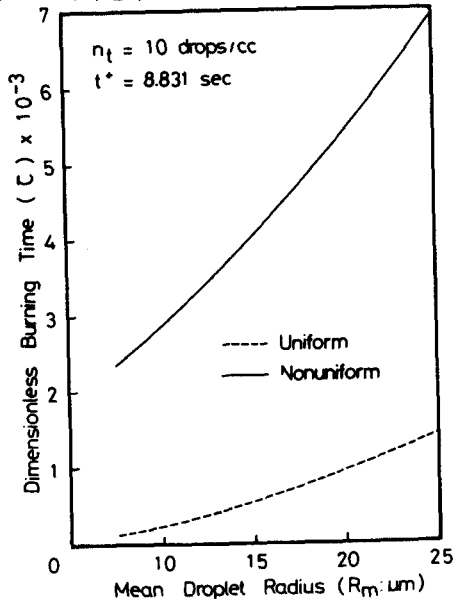


Fig. 10 Effect of initial mean droplet size on dimensionless burning time

Fig. 11은 같은 평균액적크기를 갖는 액적군들에 초기 액적수밀도의 변화에 따른 총연소시간의 변화를 나타낸 것으로서 수밀도가 증가할수록 총연소시간이 증가하며 비균일액적크기모델이 균일액적크기모델의 경우보다 총연소시간이 크며 변화율 또한 크다. 그러나 수밀도의 변화에 따른 총연소시간의 변화율은 평균액적크기변화에 따른 총연소시간의 변화율 보다 적으며, 이로서 액적군의 총연소시간은 수밀도의 영향보다는 액적의 크기에 더욱 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 12는 액적군의 액적크기분포를 균일 및 비균일크기모델로 해석할 때 시간에 따른 액적군의 크기와 외피화염의 크기 변화를 비교한 것으로 비균일분포는

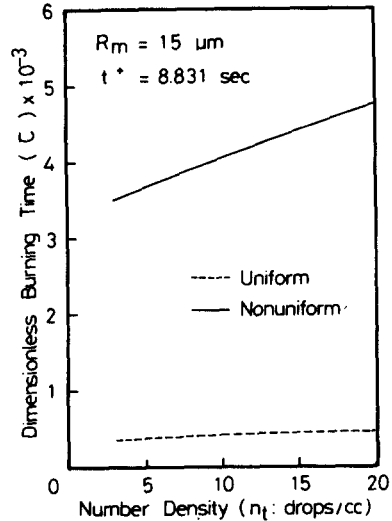


Fig. 11 Effect of initial number density of droplets on dimensionless burning time

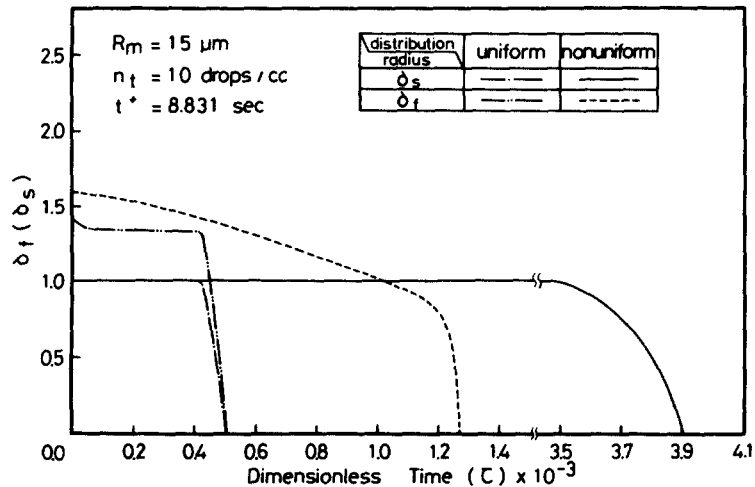


Fig. 12 Radius variation of external envelope flame and droplets clouds

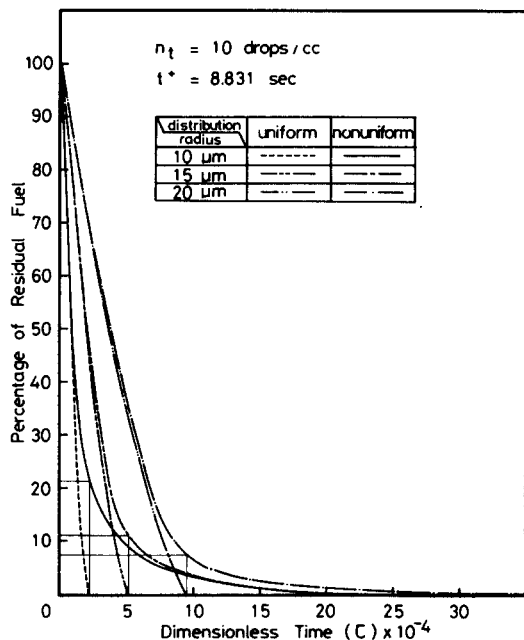


Fig. 13 Time variation of residual fuel in droplets cloud

균일분포에 비하여 집단연소시간 및 총연소시간이 크게 예측되며 외피화염과 액적군의 수축과정이 완만함을 보여준다. 또한 균일액적크기분포를 사용할 때는 전체연소시간이 모두 집단연소상태로 나타나고 비균일액적크기분포의 경우는 집단연소상태와 단일액적연소상태로 연소함을 보여준다. 이는 비균일액적크기모델의 경우 평균액적크기보다 큰 또는 작은 액적들이 연소함으로 생기는 현상으로 풀이된다.

Fig. 13은 각각의 액적크기분포모델을 사용할때 시간에 따른 액적군내의 잔류 연료량을 도시한 것으로서 선분의 기울기가 그시간의 연소율로 해석될 수 있다. 균일액적분포의 경우 연소초기부터 잔류 연료량이 급격히 감소하여 연소를 완료하나 비균일액적크기분포의 경우는 급격히 감소한후 서서히 감소하여 연소를 종료한다. 또한 균일액적크기분포로 예측한 연소종료시기에 비균일액적크기분포로 예측한 연료잔류량은 초기 액적크기가 작을수록 크며 초기 액적크기가 클때는 잔류 연료량이 10%이내로 줄어든다. 이로서 큰 평균액적크기를 갖는 액적군의 해석에는 해석이 간단한 균일액적크기분포를 사용하여 예측한 연소시간이라도 액적군내의 대부분의 연료가 이 기간동안 연소하므로 큰 오차 없이 사용될 수 있다.

4. 결 론

구형 액적군내의 액적들의 분포상태가 집단연소특성에 미치는 영향을 이론적으로 해석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 액적들의 수밀도분포상태가 내부집중형 일수록 집단연소시간 및 총연소시간이 외부집중형에 비하여 길며 초기 외피화염은 작게 형성된다.

(2) 중공형 액적군들은 솔리드형에 비하여 총연소시간이 짧으며 수밀도분포상태에 따른 연소특성의 변화가 적다.

(3) 액적군의 총연소시간을 짧게 하기 위하여는 중공형액적군 일수록 외부집중형분포 일수록 좋다.

(4) 균일액적크기분포모델은 비균일액적크기분포모델의 경우보다 총연소시간이 짧게 예측되며 비균일액적크기분포모델을 사용할 때는 연소 후반기에 단일액적연소 상태가 된다.

(5) 연소는 균일액적분포모델에서 예측한 연소기간 동안 급격히 진행된후 서서히 연소하며 종료된다.

(6) 초기 액적들의 크기가 큰 액적군 일수록 전체연료가 연소하는 총연소시간의 예측에 해석이 간단한 균일액적크기분포모델의 사용이 가능하다.

끝으로 본 모델을 보완하기 위하여는 유한화학반응모델의 첨가는 물론 점화지연기간동안의 해석이 추가되어야 하며 체계적인 실험 또한 요망된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구소의 85년도 후반기 재단연구비 지원으로 수행된 것이며, 이에 대하여 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- (1) Chiu, H.H. and Liu, T.M., 1977, "Group Combustion of Liquid Droplets", Comb. Sci. and Tech., Vol. 17, pp.127~142.
- (2) Chiu, H.H., Kim, H.Y. and Croke, E.J., 1982, "Internal Group Combustion of Liquid Droplets", 19th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.971~980.
- (3) Onuma, Y., Ogasawara, M. and Inoue, T., 1976, "Further Experiments on the Structure of a Spray

- Combustion Flame”, 16th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 561~567.
- (4) Onuma, Y. and Ogasawara, M., 1974, “Studies on the Structure of Spray Combustion Flame”, 15th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 453~463.
- (5) Labowsky, M. and Rosner, D.E., 1978, “Group Combustion of Droplets in Fuel Cloud I. Quasi-Steady Prediction”, Advances in Chemistry Series, 166.
- (6) Labowsky, M., 1980, “Burning Rates of Linear Fuel Droplet Arrays”, ASME Winter Annual Meeting, ASME 80-WA/HT-34.
- (7) 김호영, 1984, “액체연료 액적군의 비정상 집단연소”, 대한기계학회논문집, 제 8 권, 제 6 호, pp. 544~552.
- (8) Akira Umemura, 1981, “A Unified Theory of Quasi-Steady Droplet Combustion”, 18th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1355~1363.
- (9) Labowsky, M., 1980, “Calculation of the Burning Rates of Interacting Fuel Droplets”, Comb. Sci. and Tech., Vol. 22, pp. 217~226.
- (10) Choudhury, P.R. and Gerstein, M., 1982, “Analysis of a Fuel Spray Subjected to Coupled Evaporation and Decomposition”, 19th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 993~997.
- (11) Yoram Tambour, 1984, “Vaporization of Poly-disperse Fuel Sprays in a Laminar Boundary Layer Flow; A Sectional Approach”, Combustion and Flame, Vol. 58, pp. 103~114.
- (12) Tishkoff, J.M. and Law, C.K., 1977, “Application of a Class of Distribution Functions of Drop-Size Data by Logarithmic Least-Squares Technique, Trans. of the ASME. J. of Engineering for Power, pp. 684~688.
- (13) Chigier, N.A., 1979, “Energy, Combustion and Environment”, McGraw Hill, pp. 248~315.