

〈論 文〉

액체연료 액적군의 집단 점화

박용열** · 김호영*

Group Ignition of Liquid Fuel Droplets Cloud

Y.Y. Park and H.Y. Kim

Key Words : Spray Combustion(분사연소), Group Ignition(집단점화), Ignition Delay(점화지연 시간), Non-Uniform Droplet Distribution(액적의 비균일 분포), Non-Uniform Droplet Size Distribution(비균일 액적크기 분포)

Abstract

A theoretical analysis is carried out to predict the characteristics of transient ignition phenomena for the spherical fuel droplets cloud with non-uniform droplet size and number density distribution. Numerical calculations are performed for various cases depending on the combinations of the major parameters such as ambient temperature and initial distributions of droplet size and number density. The results of present study show that the ignition delay decreases for higher ambient temperature and smaller droplet size. Droplets cloud of hollow type with outer concentrated distribution ignites most rapidly.

기 호 설 명

A	: Arrhenius 반응식의 계수 (frequency factor) ($\text{cm}^3/\text{mole s}$)	Pr	: Prandtl 수
a_j	: j 구간 무차원 액적반경	q	: 반응열 (cal/mole)
b	: 차분식의 생성소멸항 또는 계단함수	R	: 액적의 반경
C_i	: i 성분의 몰농도	R_m	: 평균 액적반경
C_p	: 정압 비열 (cal/g K)	R_j'	: j 구간 평균 액적반경
E_a	: 활성화 에너지 (cal/mole)	R°	: 일반기체상수 (cal/mole K)
$F(r)$: 액적분포 함수	Re	: Reynolds 수
f	: 비연소율 함수	r_o	: 액적군의 초기반경 (cm)
G	: 제1종 집단연소수	r	: 반경방향 좌표계
k	: 기체상의 열전도 계수 (cal/cm s K)	T	: 기체상 온도
Le	: Lewis 수	T_b	: 액적의 비등온도
L	: 증발 잠열 (cal/g)	T_i	: 액적온도
N	: 액적의 수밀도	t	: 시간
N_j	: j 구간 무차원 액적수밀도	v	: 기체상의 속도
P	: 압력	W_i	: i 성분의 분자량 (g/mole)
		\bar{W}	: 평균 분자량
		Y_i	: i 성분의 질량분
		α_i	: Schvab-Zeldovich 변수
		β	: $-\alpha_F + \alpha_o$

*정회원, 고려대학교 기계공학과

**정회원, 고려대학교 기계공학과 대학원

ζ	: 대류보정항
ρ	: 기체상의 밀도 (g/cm^3)
ρ_1	: 액체상의 밀도 (g/cm^3)
ν_i	: i 성분의 정량반응 계수 (stoichiometric coefficient)
Ω	: 화학반응율

하첨자

b	: 비등점
F	: 연료
i	: i 성분
j	: 액적 크기분포 구간
l	: 액체상
O	: 산소
∞	: 주위 상태

1. 서 론

현재 사용되는 대부분의 액체연료는 분사연소의 형태로써 연소된다. 분사연소, 즉 연료의 작은 액적들의 집단인 액적군의 연소는 분무의 형성, 주위 기체상과의 열전달로 인한 액적온도의 상승, 증발 및 혼합기 생성, 점화와 연소의 순으로 진행되며, 연소특성 및 화염의 구조는 초기 분무의 상태와 이에 지배받는 점화상태에 영향을 받게 된다. 연소시스템에서의 점화시 특성 및 구조는 연속적으로 분사연소되는 시스템의 연소특성 뿐만 아니라 디젤기관 등과 같이 주기적인 과도상태를 반복하는 연소시스템의 연소특성을 좌우한다. 그러나 현재까지 분사연소 시스템에서의 점화기구에 대한 규명은 점화기구 자체, 분사된 액적들의 크기 및 수밀도 분포상태, 증발 및 혼합기구들의 복잡함으로 인하여 정확히 규명되고 있지 않으며, 디젤기관 등에서는 개략적인 실험식 등의 도입으로 동력 사이클을 해석하고 있는 실정이므로, (1) 분사연소시 이에 대한 점화현상의 규명은 분사연소화염의 구조, 연소 특성의 규명은 물론 적절한 연소를 위한 점화조건을 얻기 위하여 필요한 실정이다.

현재까지 진행된 액체연료 액적군의 집단연소 (group combustion)에 대한 연구는 대부분이 점화 후의 연소현상에 대한 연구에 국한된 것들로서 이때 점화시의 조건들은 주어진 초기조건에서의 정상상태의 해를 그대로 이용한 것들이 대부분이

다. (2~5) 액체연료 액적의 점화에 관한 연구들은 단일액적에 관한 연구로부터 시작되었으며, 연구들 중 Fendell은 단일액적의 점화에 관하여 대향류 확산화염 모델을 이용하여 해석하였고, (6) Law 등은 구형 액적들의 점화에 관한 연구들을 수행하였다. (7,9) 또한 Pindera 등은 안정성 이론을 사용하여 액적의 점화를 연구하였으며, (8) Rah et al.은 실험과 이론을 통하여 점화지연시간에 관한 연구 (10,11)를 행하여 공해물질 생성 억제에 근거를 제시하였으나, 이들 연구들은 단일 액적에 대한 것이거나 기하학적으로 배열된 몇개의 액적에 대한 것들이다. Sichel 등은 분사연소를 막연소변수 (sheath combustion parameter)를 도입하여 점화 및 소화의 한계, 액적군의 연소 지속기간 등에 대하여 연구를 수행하였으며 점화 및 연소기간의 특성에 대한 결과들을 보고하였다. (12) 이외에도 Aggarwal 등은 원통형 액적군의 점화 및 연소에 관한 연구 (13,14)를 수행함과 아울러 액체연료 점화시 내부 열전달 효과를 Law의 점화판정식을 이용하여 압력과 액적크기를 변수로 하여 해석하였다. Kim은 집단연소 현상을 집단연소모델을 통하여 해석하였으나 (4,5) 점화시 즉 초기조건을 정상해 (steady state solution)를 사용함으로써 점화전 및 점화에 대한 해석이 결여되어 있다.

이상 살펴본 바와 같이 많은 연구들이 단일 액적에 대한 연구이거나 액적군에 대한 것이라 해도 연소과정에 국한된 연구 또는 액적들의 균일 분포를 대상으로 한 것들이다. 따라서 실제의 분사연소 시스템에서 존재하는 비균일 크기 및 비균일 수밀도 분포를 갖는 액적군의 집단점화 현상에 대한 연구는 실제 분사연소시스템의 점화에 대한 기본적인 이해를 위하여도 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 액적들의 분포상태가 비균일 분포 즉 비균일 액적크기 및 수밀도 분포를 갖는 액적군에 대하여 집단점화 현상을 이론적인 해석을 통하여 규명한다. 이를 위하여 분사직후부터 점화순간까지의 과정 즉, 액적의 온도상승-증발-혼합기 형성-반응의 진행-점화의 과정에 초기 액적들의 크기 및 수밀도 분포상태와 기체상의 조건들이 중요 제변수들, 즉 온도, 속도, 성분질량농도 및 액적의 크기 분포 등에 미치는 영향 등은 물론 액적군의 증발특성, 점화특성 등을 이론적 모델을 구성하여 해석한다. 결과들은 현재 사용되고 있는 집단연소 모델의 초기조건으로 사용하며, 액적들의

분포상태에 따른 점화시의 액적군의 상태 및 점화 특성은 보다 향상된 연소시스템의 운전 및 설계에 분사조건으로서 활용될 것이 기대된다.

2. 이론해석

본 연구에 채택된 모델은 Fig. 1에 도시된 것 같이 분사된 다양한 크기의 작은 액적들의 집단으로 구성된 하나의 큰 구형액적군이 고온의 대기중에 정지된 것으로 채택하였다. 고온의 기체상 분위기에 놓인 액적들은 기체상으로부터의 열전달로 인한 연료의 비등온도까지의 온도상승, 증발, 기체화된 연료와 주위 공기의 혼합, 혼합기의 반응 진행과 이어지는 점화의 과정을 거치게 된다. 이때 액적의 크기 및 위치에 따른 액적의 수밀도는 다양한 분포를 갖는 비균일 분포상태를 갖는다.

2.1 액적크기 및 수밀도 분포

액적군 내부의 액적들은 크기가 균일하지 않으며 위치에 따라 수밀도 또한 불균일하므로, 분사 특성에 의하여 결정되는 비균일 수밀도 분포의 해석을 위하여 전형적인 분포상태인 중실형 (solid type) 분포 및 중공형 (hollow type) 분포로 구분하여 이들 각각에 대하여 액적들이 액적군 내부쪽으로 많이 분포된 내부 집중형 및 외부쪽으로 치우쳐서 많이 분포된 외부 집중형의 분포를 고려한다. 이때 중공형 분포에서 액적이 존재하지 않는 부분은 액적군 반경의 1/2에 해당하는 반경을 가진 동심구로 한다. 본 연구에서 채택한 수밀도 분포 모델들은 약화와 함께 Fig. 2에 도시하였으며 이들의 수밀도 분포 함수는 다음과 같이 택하였다.

$$F(r) = C_1 r^2 + C_2 r + C_3 \quad (1)$$

이때 상수 C_1 , C_2 와 C_3 는 액적군내의 총 연료량이 같다는 조건을 사용하여 결정한다. 또한 각 위치에서 액적들의 크기 분포는 다음의 일반적 분포함수를 사용한다.⁽³⁾

$$\frac{dN}{dR} = 4.35 \times 10^8 (2R)^{-3.796} \exp \{ -1.387 \times 10^4 (2R)^{-5.508} \} \quad (2)$$

$(1.25 \leq R \leq 32.5 \mu\text{m})$

2.2 지배방정식

운동량 보존방정식은 압력이 일정하다는 조건으

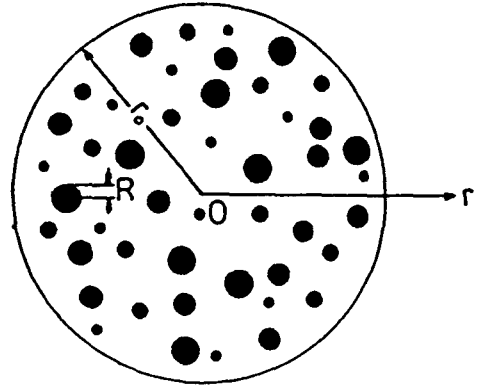


Fig. 1 Simplified model of droplet cloud

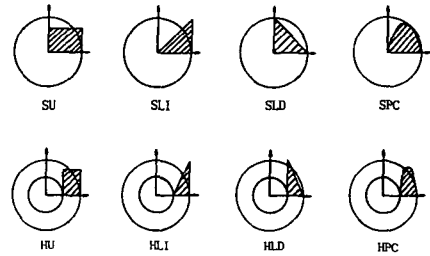


Fig. 2 Distribution models

로 대체하며 반경방향 속도는 연속방정식으로부터 구하고 액적의 온도는 액적의 크기가 작으므로 (Biot수 < 0.1) 액적내의 온도는 균일한 것으로 하여 해석한다. 연소 문제의 해석에서 일반적으로 사용하는 가정들, 즉 액적은 완전구형이며 1단계 Arrhenius형의 화학반응을 수행하고 Lewis수는 1.0이고 기체상은 이상기체의 혼합기로 가정한 후 Fig. 1의 모델에 대한 지배방정식들을 구성하고 Schvab-Zeldovich 변수들로 변환한 다음 적절히 무차원화 하면 다음과 같다.^(3,4)

● 기체상 연속방정식

기체상 즉 기체화된 연료-공기-연소가스의 혼합기에 대한 연속방정식에는 액적의 증발로 인한 생성항이 고려되며, 축대칭 구좌표의 무차원 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = \frac{G}{Le} \theta b$$

$$\theta = \sum_{j=1}^n F(r) N_j a_j f \zeta$$

$$\zeta = (1 + 0.276 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (3)$$

이때 Le 와 G 는 Lewis수와 제1종 집단연소수이며 f 는 비연소율함수이다.⁽⁵⁾

● 성분 보존방정식

기체상의 연료에 대한 성분 보존방정식에는 액적의 증발로 인한 생성항과 화학반응으로 인한 소멸항이 고려되어야 하며, 산소에 대한 성분 보존방정식에는 화학반응에 의한 소멸항이 존재하게 된다. 이들을 고려한 각성분의 무차원 보존방정식들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\alpha_F)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v \alpha_F) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r^2}{Le} \frac{\partial \alpha_F}{\partial r} \right) + \frac{G}{\nu_F W_F Le} \theta b - \frac{C_p r_o^2}{k} \Omega \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\alpha_O)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v \alpha_O) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r^2}{Le} \frac{\partial \alpha_O}{\partial r} \right) - \frac{C_p r_o^2}{k} \Omega \end{aligned} \quad (5)$$

이때 $\alpha_i = \frac{Y_i}{\nu_i W_i}$ ($i=F$: Fuel, $i=O$: Oxidizer)로 정의되는 Schvab-Zeldovich 변수이며, (4)와 (5)식에서 화학반응항을 소거하기 위하여 새로운 변수 $\beta = \alpha_O - \alpha_F$ 를 사용하면 (4)와 (5)식은 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\beta)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v \beta) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r^2}{Le} \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) - \frac{G}{\nu_F W_F Le} \theta b \end{aligned} \quad (6)$$

따라서 α_F 를 직접 구하는 대신 α_O 와 β 로부터 계산한다.

● 에너지 보존방정식

기체상에 액적의 온도상승 및 증발에 필요한 열의 공급을 위한 소멸항과 화학반응으로 인한 열생성항이 고려되며 이를 고려한 기체상에 대한 무차원 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\alpha_T)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v \alpha_T) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \alpha_T}{\partial r} \right) \\ & + \begin{cases} -\frac{G}{Le} \sum_{j=1}^n F(r) N_j a_j \zeta_j (\alpha_T - \alpha_{T1,j}) & (\text{증발전}) \\ -\left(\frac{L + C_p T_b}{q} \right) \frac{G}{Le} f \theta + \frac{C_p r_o^2}{k} \Omega & (\text{증발시}) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 온도에 대한 Schvab-Zeldovich 변수 α_T 와 Arrhenius 형태의 화학반응율 Ω 는 다음과 같다.⁽¹⁵⁾

$$\alpha_T = \frac{C_p (T' - T_b')}{q}$$

$$\Omega = A C_n^{0.25} C_O^{1.5} \exp\{-E_a C_p / (R^o (q \alpha_T + C_p T_b))\}$$

액체상에 대한 에너지방정식은 초기온도에서 비등온도까지 온도상승구간에 대하여만 사용하며 액적이 비등온도에 도달한 후부터는 일정온도를 유지하는 것으로 한다. 액체상에 대한 무차원 에너지수치식은 다음과 같다.

$$\frac{d\alpha_{T1,j}}{dt} = \frac{3\rho_r C_p r_o^2}{\rho_l C_{p,l} (R_m a_j)^2} (\alpha_T - \alpha_{T1,j}) \quad (8)$$

○ 액적반경 변화식

크기가 j 등급인 액적의 시간당 반경변화율은 증발율과 같으며 다음식으로 표현된다.

$$\frac{da_j^2}{dt} = -\frac{2\rho_r r_o^2 \zeta_j^2}{\rho_l R_m^2} f \quad (9)$$

○ 상태방정식

기체상 즉 공기, 연료 및 반응생성물은 이상기체의 혼합기로 취급하면 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{\overline{W} C_p P}{\rho_r R^o (q \alpha_T + C_p T_b)} \quad (10)$$

○ 초기조건 및 경계조건

해석을 위한 초기조건으로는 초기에 기체상내에는 연료성분은 없고 산소성분은 대기중의 농도값을 가지며, 기체상의 초기온도 및 액적의 온도는 일정값으로 주어진다. 즉,

$$\begin{aligned} t=0; \alpha &= \alpha_{0\infty}, \beta = \beta_{0\infty}, \alpha_T = \alpha_{T\infty}, \alpha_{T1} = \alpha_{T1\infty}, \\ v &= 0, \rho = \rho_{\infty} \end{aligned}$$

경계조건으로는 액적군이 구형이므로 중심에서의 속도는 0이고 나머지 변수는 r-방향으로의 구배가 0이 된다. 또한 액적군 외부 멀리 떨어진 위치에서의 온도 및 산소농도 등은 일정한 값으로 주어진다. 즉,

$$\begin{aligned} t > 0, r=0; v &= 0, \frac{\partial \beta}{\partial r} = \frac{\partial \alpha_O}{\partial r} = \frac{\partial \alpha_T}{\partial r} = 0 \\ t > 0, r=\infty; \beta &= \alpha_{0\infty}, \alpha_T = \alpha_{T\infty}, \alpha_0 = \alpha_{0\infty} \end{aligned}$$

3. 수치해석

액적의 초기분포 및 크기변화를 구하는 데는 수치적분을 사용하고 그 외의 지배방정식들은 유한

차분법(FDM)을 사용하여 차분화하며 거리에 대하여는 Power-law scheme을, 시간에 대하여는 Crank-Nicolson scheme을 사용하며⁽¹⁶⁾ 차분식들의 계산에는 TDMA를 사용한다. 이 때 액적군 내에 포함된 전체 연료량은 같도록 하였으며 따라서 액적의 평균크기가 정해지면 수밀도는 이에 상응하여 결정된다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 연료로서 옥탄(Octane: C_8H_{18})을, 산소의 공급원로서는 대기중의 공기로 하였으며, 초기 액적군의 반경은 5 cm로 하였다. 이 때 연료 및 공기에 대한 중요 물리화학적 물성치들은 $\nu=1.0$, $\nu_0=12.5$, $W_F=114.14$ g/mole, $W_O=32$ g/mole, $\bar{W}=30.2$ g/mole, $\rho_l=0.8$ g/cm³, $\rho=0.3482 \times 10^{-3}$ g/cm³, $q=1.223 \times 10^6$ cal/mole, $L=86$ cal/g, $k=6 \times 10^{-4}$ cal/cm SK, $C_{pl}=0.52$ cal/g K, $C_p=0.273$ cal/g K, $\mu=4.244 \times 10^{-4}$ g/cm s, $T_b=398.7$ K, $Y_0=0.232$, $A=4.6 \times 10^{11}$ cm³/mole K, $E_a=30,000$ cal/mole 등이다. 해석의 일관성을 위하여 주위온도 1300 K, 평균수밀도 1000 drops/cc, 액적평균반경 35 μ m인 경우(기준상태)를 중심으로 하여 각 변수들의 변화를 고찰하며, 분사순간부터 액적들의 온도가 비등점에 도달하여 증발을 시작하기까지의 시간을 '증발지연기간'이라 정의한다. 연료의 점화판정은 반응시작후 온도가 상승하여 연료의 점화온도 이상이 될 때를 점화시기로 택하였다.

Fig. 3은 기준상태에서 중실형 액적분포(SPC)에

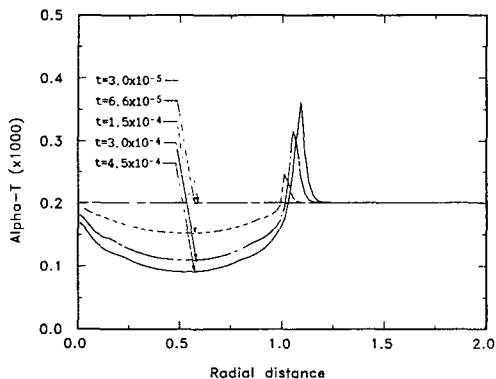


Fig. 3 Radial distribution of temperature Schvab-Zeldovich variable with time for SPC

대한 온도분포를 여러시점에서 도시한 것으로, 초기에 일정하던 기체상의 온도가 액적군 내부에서는 액적의 온도상승 및 증발을 위한 액적으로의 열전달로 인하여 점차 감소하며, 액적군 경계로부터는 반응이 시작된 후 가속되어 점차 온도가 증가하여 점화하게 되며, 점화위치는 액적군 경계의 약간 외부쪽에 나타나고 있음을 보여준다. 이는 중실형 액적분포가 액적군 경계부근에서의 수밀도가 내부쪽보다 상대적으로 작기 때문에 증발량이 적게 되고 따라서 충분한 반응이 이루어지기까지 액적군 내부로부터 외부쪽으로 증발된 연료가 전달되어야 하기 때문으로 해석된다. Fig. 4는 기준상태에서 중실형(SPC) 분포에 대한 연료 및 산소성분의 질량 농도 반경방향 분포를 각각의 시간에서 비교 도시한 것이다. 초기에 존재하지 않던 연료성분은 액적이 증발을 시작하면서부터 나타나며, 수밀도가 큰 부분

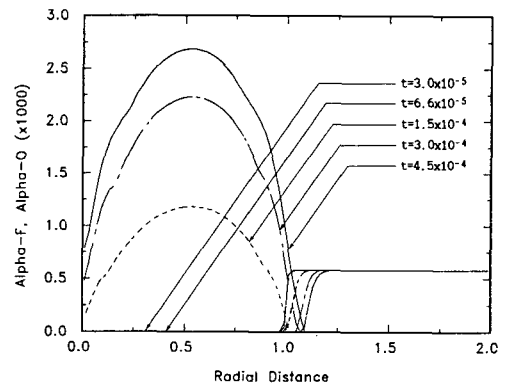


Fig. 4 Radial distribution of mass fraction Schvab-Zeldovich variable with time for SPC

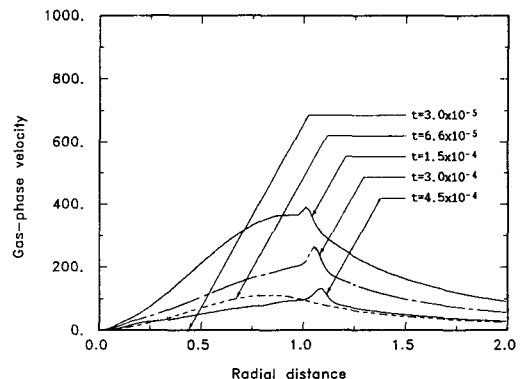


Fig. 5 Radial distribution of gas-phase velocity at various time for SPC

즉 $r=0.5$ 부근에서 많은 액적들이 증발하여 질량 농도가 کم을 알 수 있고, 또한 시간이 경과함에 따라 액적군 외부로 확산되어 나가는 것을 볼 수 있다. 산소성분은 시간경과에 따라 액적군 경계로부터 점차 내부로 확산되어 들어가며 연료 성분의 생성이후부터는 액적군 경계부근에서 반응에 의해 소멸되어 감을 보여준다. Fig. 5는 기준상태하의 중실형분포(SPC)에 대한 반경방향 속도분포를 시간에 따라 비교 도시한 것이다. 속도는 액적이 증발을 시작하면서부터 나타나며 처음에는 큰 값을 보이다가 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 보여준다. 이는 다양한 크기의 액적들 중에서 시간이 지남에 따라 증발하는 액적들의 크기가 작아짐으로 인하여 증발량이 줄어들기 때문인 것으로 해석된다. 또한 속도분포의 피크점은 시간이 지남에 따라 외부로 이동함은 Fig. 3의 온도분포와 비교해 보면 속도의 피크는 온도의 피크와 일치하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 속도분포에서의 피크는 화학반응에 의한 온도상승에 따른 기체상의 팽창에 의한 것으로 해석된다. Fig. 6은 기준상태에서 중실형 분포에 대하여 초기직경이 $33\mu\text{m}$ 인 액적들의 반경방향 액적반경 변화를 시간에 따라 비교 도시한 것이다. 비등온도에 도달한 이후에 증발로 인하여 전체적으로 서서히 감소하던 액적의 크기가 시간이 지날수록 액적군의 중심부분과 경계쪽에서 급격히 증발하여 감소 및 소멸하는 것을 보여준다. 이는 액적군 중간부($r=0.5$) 부근에서 초기에 많은 액적들에서의 증발로 인하여 포물선형으로 온도저하가 나타나는 현상과 액적군의 중심과 경계부근에서 온도가 높게 나타나므로 중심 및 경계부근에서의 액적 크기 감소율이 크게 나타나는 것으로 해석된다.

Fig. 7은 기준상태에서 일정시간 즉 중간시점에서의 연료 및 산소성분의 질량농도 분포를 각각의 수밀도 분포(SU, SLI, SLD, SPC)에 대하여 비교 도시한 것이다. 액적군 내부의 연료성분의 농도분포는 수밀도 분포에 따라서 큰 차이를 보이고 있으며 반응위치 즉 점화위치에서 급격히 감소함을 보여준다. 또한 질량농도 분포는 초기 액적의 분포상태와 비슷한 경향을 보이며, 즉 수밀도가 상대적으로 큰 부분에 성분농도가 크게 나타나므로 증발특성은 초기 분포상태에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 기준상태에서 일정시간 즉 증발 시작후 점화되기전 일정 시점에서 각각의 수밀도 분포(HU, HLI, HLD, HPC)에 대한 연료 및 산소

성분의 질량농도 분포를 비교 도시한 것으로서 연료성분의 분포는 초기액적의 분포상태와 비슷한 경향을 보이며 액적이 존재하지 않는 부분($r<0.5$)에

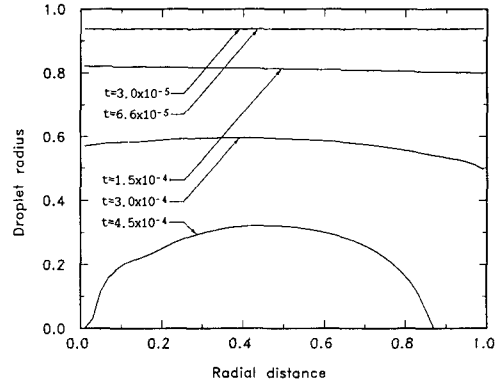


Fig. 6 Variation of the smallest droplet radius with time for SPC

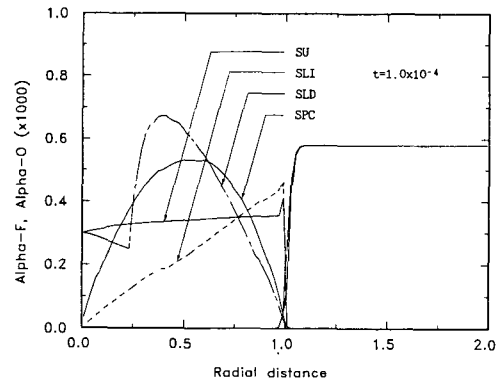


Fig. 7 Radial distribution of mass fraction Schvab-Zeldovich variable for solid type distribution models at given time

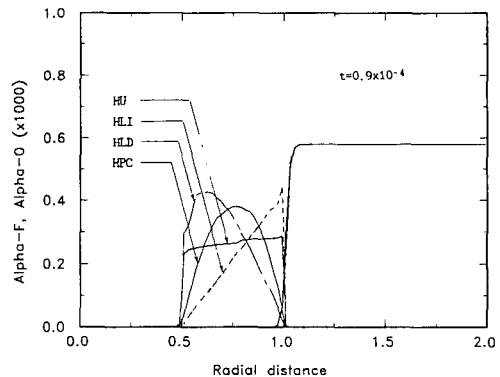


Fig. 8 Radial distribution of mass fraction Schvab-Zeldovich variable for hollow type distribution models at given time

는 연료 성분이 없으며 반응위치에서 연료 및 산소의 농도는 급격히 감소함을 알 수 있다. 즉 액적군의 점화특성 즉 점화위치, 시간 등에 영향을 주는 연료 및 산소성분의 분포상태는 초기액적들의 분포상태에 크게 영향을 받으므로 점화상태를 제어하기 위하여는 초기 액적의 분포상태를 제어하여야 함을 추론할 수 있다.

Fig. 9는 기준상태하의 중실형 분포들의 점화순간의 온도분포를 각각의 수밀도 분포에 대하여 비교 도시한 것이다. 내부에 액적들이 집중된 분포(SLD)일수록 액적군 내부에서의 많은 증발로 인하여 액적군 내부는 낮은 온도분포를 갖음은 물론 점화시 화염의 위치는 액적군 경계로부터 멀어지며, 액적들이 외부로 집중되어 분포될수록(SLI) 점화시 화염의 위치는 액적군 경계면 가까이에 위치함을 보여준다. 이는 조밀한 액적들이 외부에서

전달되어온 열을 대부분 액적의 증발에 사용함으로써 조밀한 액적부분이 일종의 열차단막과 같이 작용함으로써 나타나는 현상으로 해석된다. Fig. 10은 기준상태에서 중공형 분포들에 대하여 점화되는 순간의 온도 분포를 각각의 수밀도 분포에 따라 비교 도시한 것으로, 중실형 분포와 같은 경향을 보여준다. 또한 액적들이 존재하지 않는 내부 영역에서는 온도변화가 거의 없음을 볼 수 있고, 점화시 화염의 형성 위치는 수밀도 분포가 외부 집중형일수록(HLI) 액적군 경계 가까이에 위치함을 보여준다.

Fig. 11은 중실형 분포중 SPC 분포에 대하여 주위온도의 변화에 따른 액적군의 증발지연기간 즉 초기에서 액적이 증발을 시작하는 시간 및 점화지연기간 즉 초기부터 점화시까지의 기간의 변화를 도시한 것으로 주위 온도가 높을수록 증발 및 점화지연기간이 짧아짐을 보여준다. 이때 주위온도의

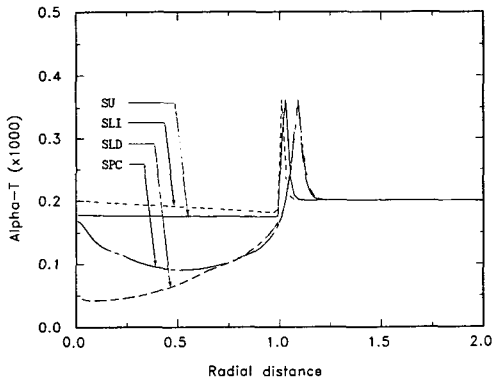


Fig. 9 Radial distribution of temperature Schwab-Zeldovich variable for solid type distribution models at ignition time

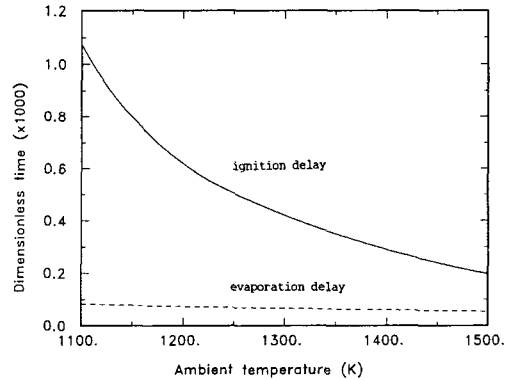


Fig. 11 Evaporation and ignition delay with the variation of ambient temperature for SPC

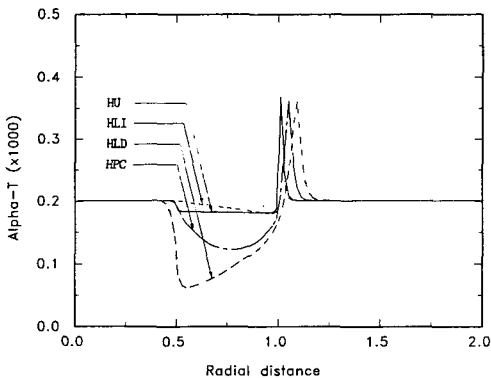


Fig. 10 Radial distribution of temperature Schwab-Zeldovich variable for hollow type distribution models at ignition time

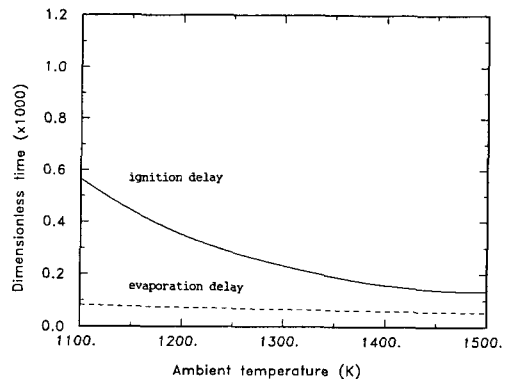


Fig. 12 Evaporation and ignition delay with the variation of ambient temperature for HPC

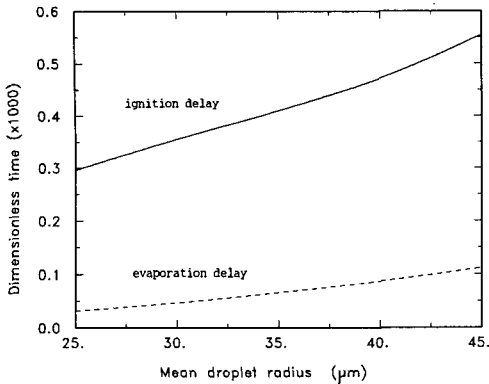


Fig. 13 Evaporation and ignition delay with the variation of mean droplet radius for SPC

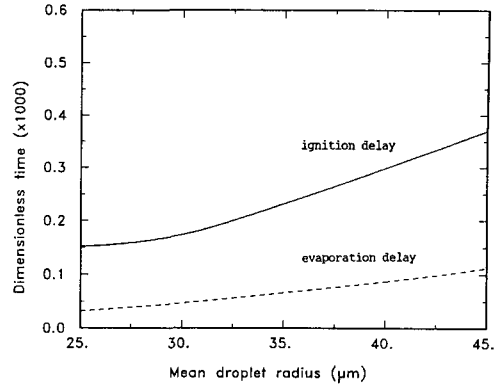


Fig. 14 Evaporation and ignition delay with the variation of mean droplet radius for HPC

증가에 따라 점화지연기간은 급격히 감소하며 증발지연기간은 완만히 감소함을 보여준다. 이는 증발보다는 화학반응이 주위온도에 더 민감함으로써 나타나는 현상으로 해석된다. Fig. 12는 중공형 분포 중 HPC 분포에 대하여 주위온도의 변화에 따른 액적의 증발지연기간 및 점화지연기간의 변화를 도시한 것으로 중실형 분포와 같은 경향을 보여주나 같은 폭의 주위온도 상승시 점화지연기간의 감소폭이 작음을 보여준다.

Fig. 13과 Fig. 14는 초기 평균액적 크기 변화에 따른 액적의 증발지연기간 및 점화지연기간을 중실형의 SPC분포와 중공형의 HPC분포에 대하여 도시한 것이다. 초기액적의 크기가 클수록 증발지연기간 및 점화지연기간이 길어지는 경향을 보이고 있다. 또한 액적의 크기가 커질수록 점화지연기간의 증가폭이 증발지연기간의 증가폭보다 크게 나타난다. 이는 액적군이 같은 양의 연료를 포함할 때, 액적의 크기가 크면 전체 액적의 수는 적어지고 이로 인하여 액적 전체의 표면적이 감소함으로써 증발율이 감소함으로 생기는 현상으로 해석된다.

Fig. 15는 기준상태하에서 본 연구에서 채택한 각각의 수밀도 분포에 대한 증발지연기간 및 점화지연기간을 비교 도시한 것이다. 증발지연기간은 모든 모델에서 차이가 거의 없으나 점화지연기간은 분포상태에 따라 큰 차이를 보여준다. 즉, 중공형이 중실형보다 점화지연기간이 짧으며, 또한 내부 집중형의 분포가 외부집중형 분포보다 점화지연기간이 길게 나타나고 있다. 이는 액적군의 점화는 액적군 경계부근에서 산소와 반응하여 시작되나, 외부 집중형의 경우는 액적군 경계부근에서 많은

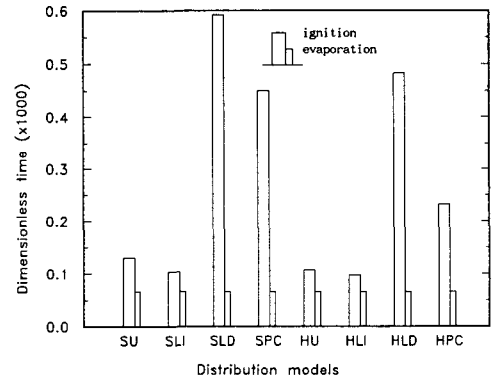


Fig. 15 Comparison of evaporation and ignition delays for the distribution models

액적들의 증발로 인하여 기체화된 연료가 많이 공급되어 산소와의 반응이 일찍 시작되는 것으로 해석된다.

5. 결론

액적군내의 액적분포 상태에 따른 점화현상을 규명하기 위하여 이론적인 모델을 구성한 후 액적들의 분포상태에 따른 결과들을 분석한 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 점화시 화염은 액적군 표면 부근에서 형성되며 수밀도 분포가 내부 집중형일수록 액적군 경계에서 멀리에 위치한다.
- (2) 증발에 의하여 생성된 연료 성분의 농도는 수밀도 분포와 상응하여 유사한 분포를 이룬다.
- (3) 기체상의 속도의 최대점은 항상 온도의 최대

점에서 나타나며 시간의 경과에 따라 외부로 이동한다.

(4) 주위온도가 높을수록, 평균액적 크기가 작을수록 점화지연시간 및 증발지연시간은 짧다. 또한 수밀도 분포가 증공형 외부집중형일수록 점화지연시간은 짧으나 증발지연시간은 이에 관계없이 거의 일정하다.

참고문헌

- (1) Benson, R.S., 1979, *Internal Combustion Engine*, Pergamon Press.
- (2) Kim, H.Y. and Chiu, H.H., 1983, "Group Combustion of Liquid Fuel Sprays," AIAA 21th Aerospace Sci. Meeting, AIAA-83-0150.
- (3) 전철균, 김호영, 1986, "비균일 액적분포가 액적군의 비정상 집단연소에 미치는 영향," 대한기계학회논문집.
- (4) 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.
- (5) 김호영, 1986, "액체연료 액적군의 비정상 집단연소," 대한기계학회논문집, 제8권, 제6호, pp. 544~552.
- (6) Fendell, F.E., 1965, "Ignition and Extinction in Combustion of Initially Unmixed Reactants," *J. Fluid Mech.*, 2, Part 2, pp. 281~303.
- (7) Law, C.K. and Chung, S.H., 1980, "An Ignition Criterion for Droplets in Sprays," *Comb. Sci. and Tech.*, 21, pp. 17~26.
- (8) Pindera, M.-Z. and Brzustowski, T., 1984, "A Model for the Ignition and Extinction of Liquid Fuel Droplets," *Comb. and Flame*, 55, pp. 79~81.
- (9) Botros, P., Law, C.K. and Sirignano, W.A., 1980, "Droplet Combustion in a Reactive Environment," *Comb. Sci. and Tech.*, 21, pp. 123~130.
- (10) Rah, S.C., Sarofim, A.F. and Beer, J.M., 1986, "Ignition and Combustion of Liquid Fuel Droplets. Part 1: Impact on Pollutant Formation," *Comb. Sci. and Tech.*, 48, pp. 273~284.
- (11) Rah, S.C., Sarofim, A.F. and Beer, J.M., 1986, "Ignition and Combustion of Liquid Fuel Droplets. Part 2: Ignition Studies," *Comb. Sci. and Tech.*, 49, pp. 169~184.
- (12) Sichel, M. and Palaniswamy, S., 1984, "Sheath Combustion of Sprays," 20th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1789~1798.
- (13) Aggarwal, S.K. and Sirignano, W.A., 1984, "Ignition of Fuel Sprays: Deterministic Calculations for Idealized Droplet Arrays," 20th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1773~1780.
- (14) Aggarwal, S.K., 1985, "Effects of Internal Heat Transfer Models on the Ignition of a Fuel Droplet," *Comb. Sci. and Tech.*, 42.
- (15) Westbrook, C.K. and Dryer, F.L., 1984, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," *Prog. Energy Comb. Sci.*, 10, pp. 1~57.
- (16) Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill.