

미분탄의 집단점화 해석

서 경 근* · 김 호 영**

Analysis of Group Ignition of Pulverized Coal Particles

K. K. Suh and H. Y. Kim

Key Words: Pulverized Coal, Group Ignition

Abstract

Pulverized coal is widely used as the source of electrical power generation and industrial processes. Numerical analysis on the transient ignition process of the cloud of pulverized coal particles in various cases is carried out. Particle radius, initial particle temperature, number density are chosen as major parameters that influence the characteristics of ignition and combustion. The result can be summarized as follow. The ignition occurs at the position that is closed to the surface of the cloud. Maximum temperature and velocity appear at ignition point, and the concentrations of gaseous fuel and oxidizer decrease rapidly near the ignition point. The chemical reaction takes place in wider zone as number density and particle radius decrease. The ignition delay is shortest when particle radius is about $50 \mu\text{m}$, and tends to be shorter as number density and initial ambient temperature increase.

1. 서 론

현재 세계의 중요 산업국가들은 증가하는 에너지 수요에 대처하기 위하여 에너지 소비절약과 대체 에너지원의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 구미 선진국에서는 미분탄 연소를 비롯하여 석탄의 가스화와 액체화를 통한 깨끗

한 연료로 전환하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 석탄의 소비량도 계속적으로 증가하는 추세이다. 이중 미분탄 연소에 대한 연구들은 크게 연소효율의 증대, NOx와 SOx를 포함하는 공해물질의 생성억제, 연소실 벽면의 오염 (fouling) 과 발생 슬래그(slag)의 처리등에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있다.

실제 미분탄 연소기에서는 직경이 약 $75 \mu\text{m}$ 또는 그 이하인 미분탄이 버너 노즐로부터 분사된 후 착화 연소된다. 이때 착화특성과 연소상태는 유동장내의 미분탄 분포상태 즉 입자의 크기와 수밀도 분포에 따라 달라지며 분포상태는 입

* 기아자동차

** 고려대학교

구조건과 유동조건에 따라 결정된다. 실제 단일 미분탄입자의 점화와 연소과정은 휘발분 방출과 연소에 이은 고정탄소의 표면연소로 이루어지는 과정으로 이에 대한 연소 모델은 비교적 간단하다. 그러나 실제 연소기에서 고부하 상태에서 분무되어진 조밀한 분포상태의 입자들은 단일입자와 같이 거동을 하지 않으며 미분탄 입자들간의 상호작용으로 인하여 집단적인 연소과정으로 연소한다. 실제 미분탄 연소기의 연소효율 증대 및 공해물질 생성억제에 대한 연구를 수행하기 위해서는 기본적으로 미분탄 입자군의 집단점화 및 연소특성이 규명되어야 하나 이에 대한 기초연구는 거의 없는 실정이다.

현재까지의 집단 연소에 대한 연구들은 대부분이 액체연료 액적들에 대한 것들로서 Chiu 등^[1]은 집단 외피 화염면 외부에는 단일 입자 연소, 외피 화염면 내부에는 증발만 일어나는 모델을 제시하였고, 액적군의 총 연소시간을 구하였다. 김^[2]은 구대칭인 액체 연료집단에 대한 비정상 연소과정을 수치해석하여, 조밀한 집단에 대해서는 외부 집단연소가 진행되며, 조밀하지 않은 집단에 대해서는 내부집단연소와 단일액적 연소가 동시에 일어남을 밝혀내었으며 이외에도 액체연료 액적군의 집단연소에 대한 연구들은 많이 보고되었다. 미분탄에 대해서는 Annamalai와 Ramalingams^[3] 등이 집단 연소수(G)에 따른 차/탄소 덩어리의 집단 연소에 대한 연소율 등을 제시하였고, 실험적으로 구한 단일입자연소 모델은 입자 사이의 간격이 조밀하지 않은 경우에만 적용할 수 있음을 밝혔다. 현재까지의 연구들을 살펴보면 액적군에 대한 점화와 연소에 대한 연구들은 많이 보고된 반면 미분탄 입자군의 점화와 연소에

대한 연구들은 거의 없는 실정이다.

본 연구는 미분탄 입자군의 집단 자연 점화(spontaneous ignition)과정 및 특성을 이론적인 모델을 통하여 규명하는 것을 목적으로 한다. 이때 초기 주위온도 및 입자군의 분포상태 즉 수밀도와 입자 크기 등을 중요 변수로 하여 온도분포, 산소 및 연료의 농도 분포, 휘발성분 속도, 점화 시기 등을 수치적으로 구하며 미분탄의 집단점화모델을 제시하고자 한다.

2. 이론 해석

미분탄 입자들이 고온분위기에 노출되면 주위로부터 열전달로 인하여 온도가 열분해 온도까지 상승한 후 입자내의 휘발분은 열분해 되어 기체상의 휘발성분을 방출한다. 휘발성분과 공기중의 산소가 혼합되어 형성된 가연성 혼합기는 발열 화학 반응 즉 연소하며 열을 발생시킨다. 이때 석탄에는 열분해를 위한 분해열이 공급되어야 하고 연소로 인하여 열이 발생한다. 이때 발생하는 반응열과 공급하는 분해열의 차가 혼합기의 온도를 변화시키며, 이 전달열의 차가 입자 주위로의 열 손실보다 크면 혼합기의 온도는 계속 상승하여 반응이 가속되고 이로 인하여 더욱 많은 열을 발생시킨다. 이와 같은 반응이 계속되어 온도가 계속 상승하여 가연성 혼합기의 점화온도에 도달하면 화염을 형성하며 점화된다. 이때 입자군의 집단 점화특성은 입자의 분포상태와 주위 환경에 영향을 받으며 본 연구에서는 집단점화특성을 규명하기 위한 모델을 다음과 같이 구성하였다.

미분탄입자 집단은 Fig. 1과 같이 균일한 크기의 작은 입자들이 완전한 구의 형상을 갖는 정지된 입자군내에 균일하

게 분포 되어 있는 것으로 한다. 물리적인 고찰과 해석편의를 위하여 화학반응은 1단계 2차 Arrhenius 반응이며 Lewis 수는 1이고 확산은 Fick의 법칙을 따른다는 가정을 채택하였다. 또한 중력, 부력, 복사의 효과는 무시하고 압력은 일정하며 입자는 질량과 열의 생성 소멸 항 역할을 한다. 입자의 크기가 작으므로 입자 내부의 온도는 균일하고 열분해 과정중 입자의 크기는 일정하다는 가정들을 택하였다.

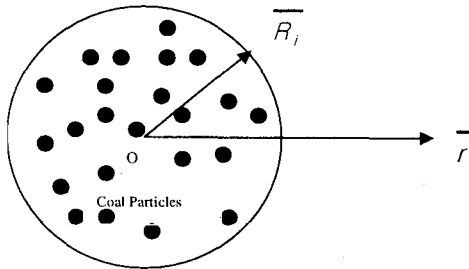
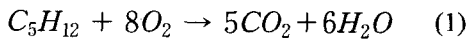


Fig. 1 Simplified model of pulverized coal particle group

석탄은 종류에 따라 휘발분의 조성성분도 다양하나 본 연구에서는 펜탄(C₅H₁₂)을 휘발성분으로 하였으며,^[5] 이 이에 대한 화학반응식은 다음과 같다.



본 모델에서의 지배 방정식은 연속방정식, 산소와 휘발성분의 성분보존방정식, 고체상과 기체상의 에너지보존 방정식 등이며, 기체성분의 반경방향 속도분포는 연속방정식에서 구한다. Fig. 1의 모델에 대한 지배 방정식들은 다음과 같다.

연속방정식.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \bar{\rho} v) = \bar{n} \dot{m}_{VM} \quad (2)$$

여기서, \bar{n} : number density

\dot{m}_{VM} : 휘발성분의 생성율

미분탄 입자의 온도가 열분해 온도에 이르면 고체상의 입자에서 기체상의 휘발성분을 방출하는 열분해가 일어나기 시작한다. 연속방정식의 생성항은 열분해 시 방출되는 휘발성분에 의한 단위부피당 단위시간당의 휘발성분 생성률 $\bar{n} \dot{m}_{VM}$ 이다. 휘발성분의 생성항은 Kobayashi^[7]가 제안한 두 경쟁률 모델 (two competing rate)의 식이 실험치와 비교적 잘 일치하는 이유로 사용하였다. 따라서 식 (2)의 생성항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{VM} &= \dot{m}_{VM_I} + \dot{m}_{VM_{II}} \\ &= m_{P,i} (R_I a_I + R_{II} a_{II}) e^{-(R_I + R_{II})t} \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_j = B_j e^{-E_j / \bar{R} T_r} \quad j = I, II \quad (4)$$

$$m_{P,i} = \bar{\rho}_{P,i} \pi \frac{d_i^3}{6} \quad (5)$$

\dot{m}_{VM_I} 는 상대적으로 낮은 온도에서 낮은 활성화에너지에 의한 휘발성분 생성률이고, $\dot{m}_{VM_{II}}$ 는 상대적으로 높은 온도에서 높은 활성화 에너지에 의한 휘발성분 생성률이며, 생성률은 이 두 종류의 합으로 구한다^[4]. a_I , a_{II} 와 B_j 는 상수이며 그 값들은 Table 1과 같다^[8].

Table 1. Constants in Kobayashi model

B_I (1/s)	3.7×10^5	B_{II} (1/s)	1.5×10^{13}
a_I	0.4	a_{II}	0.8
E_I (kJ/kmole)	7.4×10^4	E_{II} (kJ/kmole)	2.5×10^5

입자는 온도 \overline{T}_p 가 열분해 온도 (600K)에 도달하면 휘발성분이 방출되며, 이때 연료와 산소성분에 대한 보존방정식은 다음과 같다.

성분보존방정식.

연료 성분 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho Y_F}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 \rho v Y_F}) \\ = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 \rho D} \frac{\partial \overline{Y_F}}{\partial r}) + S_F \quad (6) \end{aligned}$$

식 (6)의 생성항은 연료의 열분해로 인한 기체상의 생성항과 화학반응에 따른 소멸항의 합이며 다음과 같다.

$$S_F = \overline{n} \dot{m}_{VM} - \nu_F \overline{W}_F \Omega \quad (7)$$

식 (7) 우변의 첫 번째 항은 휘발성분 생성항, 두 번째 항은 반응에 의한 연료 성분의 소멸항이다. Ω 는 Arrhenius 반응식으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Omega = \frac{\overline{A} \overline{\rho}^2}{\overline{W}_F \overline{W}_O} \overline{Y}_F \overline{Y}_O \exp\left[\frac{-\overline{E}_a}{R \overline{T}_g}\right] \\ \frac{\overline{E}_a}{R} = \overline{T}_a \quad (8) \end{aligned}$$

산소 성분 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho Y_O}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 \rho v Y_O}) \\ = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 \rho D} \frac{\partial \overline{Y_O}}{\partial r}) + S_O \quad (9) \end{aligned}$$

산소는 생성은 없고 단지 화학반응에 의한 소멸만이 존재하게 된다. 따라서 식 (9)의 생성항은 다음과 같다.

$$S_O = -\nu_O \overline{W}_O \Omega \quad (10)$$

에너지 방정식.

미분탄 입자($\overline{T}_p < 600K$):

$$\frac{d\overline{T}_p}{dt} = \frac{3\overline{h}}{\rho_{p,i} C_{p,p,a}} (\overline{T}_g - \overline{T}_p) \quad (11)$$

식(11)은 미분탄 입자가 기체상으로부터의 열전달로 인해 온도가 상승하는 구간의 에너지방정식이다. 열분해 시작온도에 이르면 휘발성분이 방출되며 휘발온도에 이르면 그 온도에서 상승을 멈춘다.

기체상 :

$\overline{T}_p < \overline{T}_{VOL}$ 구간 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho c_P T_g}) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 k} \frac{\partial \overline{T}_g}{\partial r}) \\ - \overline{n} \overline{h} (4\pi \overline{a}^2) (\overline{T}_g - \overline{T}_p) \quad (12) \end{aligned}$$

$\overline{T}_p \geq \overline{T}_{VOL}$ 구간 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho c_P T_g}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 \rho v c_P T_g}) \\ = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(\overline{r^2 k} \frac{\partial \overline{T}_g}{\partial r}) + S_T \quad (13) \end{aligned}$$

이때 \bar{T}_{VOL} 은 미분탄의 열분해 온도이다. 기체상에 대한 생성항은 휘발성분의 방출이 없는 동안에는 입자의 온도상승을 위한 열전달만 있으며, 방출이 있을 경우 분해열에 의한 열 손실과 화학 반응에 의한 열 생성등이다. 따라서 식 (13)의 생성항은 다음과 같다.

$$S_T = -\bar{n} \dot{m}_{VM} \bar{P} + \nu_F \bar{q} \Omega \quad (14)$$

여기서 \bar{P} : 입자의 열분해열
 \bar{q} : 반응열

위의 지배 방정식들의 해석을 위한 초기조건과 경계조건들은 다음과 같다. 초기에 입자집단은 상온 상태이고, 순간적으로 열분해 온도보다 높은 온도의 분위기에 노출된다. 따라서 초기 기체상에는 연료성분은 전혀 없고, 산소의 농도는 대기중의 산소 농도와 같으며, 분포는 집단 중심에서 0이고 집단내부에서 선형적으로 증가하다가 집단 경계에서부터 대기중의 값으로 일정하다고 가정하였다. 입자집단은 중심에서 속도가 0이며, 성분농도와 온도는 집단중심에서 구배가 0인 경계조건을 갖는다. 즉,

$$\bar{t} = 0 ; \quad \bar{R} = \bar{R}_i$$

$$\bar{Y}_F = 0$$

$$\bar{Y}_O = \frac{\bar{r}}{\bar{R}_i} \bar{Y}_{O,\infty} \quad (0 \leq \bar{r} < \bar{R}_i)$$

$$\bar{Y}_O = \bar{Y}_{O,\infty} \quad (\bar{r} \geq \bar{R}_i)$$

$$\bar{T}_P = \bar{T}_{P_i} , \quad \bar{T}_g = \bar{T}_\infty$$

$$\bar{t} > 0 , \quad \bar{r} = 0 ;$$

$$\bar{v} = 0 , \quad \frac{\partial \bar{Y}_F}{\partial r} = \frac{\partial \bar{Y}_O}{\partial r} = \frac{\partial \bar{T}_g}{\partial r} = 0$$

$$\bar{t} > 0 , \quad \bar{r} = \infty ; \quad \bar{Y}_F = 0$$

$$\bar{Y}_O = \bar{Y}_{O,\infty}$$

$$\bar{T}_g = \bar{T}_\infty$$

위의 지배 방정식들은 다음과 같은 무차원화 변수들을 사용하여 무차원화한 후 수치 해석하여 해를 구하였다.

$$v = \frac{\bar{v}}{v^*} , \quad v^* = \frac{\bar{k}}{\rho c_P R_i}$$

$$t = \frac{\bar{t}}{t^*} , \quad t^* = \frac{\bar{\rho} \bar{c}_P \bar{R}_i^2}{\bar{k}}$$

$$\alpha_T = \frac{\bar{c}_P (\bar{T} - \bar{T}_b)}{\bar{q}} , \quad r = \frac{\bar{r}}{\bar{R}_i}$$

$$Y_F = \frac{\bar{Y}_F}{Y_F^*} , \quad Y_F^* = \frac{\nu_F \bar{W}_F}{\bar{W}}$$

$$Y_O = \frac{\bar{Y}_O}{Y_O^*} , \quad Y_O^* = \frac{\nu_O \bar{W}_O}{\bar{W}}$$

$$n = \frac{\bar{n}}{n_i} , \text{ 여기서 } \bar{W} = \nu_F \bar{W}_F + \nu_O \bar{W}_O$$

위의 변수들로 무차원화한 지배 방정식들 중 연속방정식은 수치적분으로 해를 구하며, 성분보존방정식과 에너지 방정식은 유한차분법을 사용하여 수치해를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 수치해를 구하기 위하여 채택한 미분탄의 물리화학적 물성치들을 Table 2 에 정리하였다^{9, 10)}. 반응에 사용된 휘발성분으로는 펜탄(C₅H₁₂)을 사용하였고^{5,6)}, 산소의 공급원으로는 공기를 사용하였다. 수치해를 구하는 과정에서 점화 및 연소특성에 영향을 미치는 중요한

수들은 미분탄 입자들의 직경, 수밀도와 입자군 주위 온도를 택하였으며 이들을 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 즉, 초기의 주위온도는 800, 900, 1000, 1100K로 하였고, 수밀도는 600, 800, 1000, 1200particles/cc로, 입자의 직경은 30, 45, 60, 75 μm 의 각각을 조합한 경우로 계산하였다.

점화의 판정은 입자들이 고온에 노출된 후 온도변화를 시간에 따라 관찰하면 뾰족한 최고점이 나타나며 이후 온도는 더 이상 상승하지 않고 공간상으로만 퍼져나간다. 이때까지의 시간을 점화지연기간(ignition delay)이라 정의하며 이때의 온도를 점화온도로 하였다. 모든 경우 점화온도는 거의 일정하였다.

Table 2 Properties of Coal

property	value
$\bar{\rho}_{P,i}$	0.965 (g/cm ³)
$\bar{\rho}$	0.3482E-3 (g/cm ³)
\bar{q}	8.459E+5 (cal/mole)
\bar{P}	99 (cal/g)
\bar{k}	1.6E-4 (cal/cm · s · K)
$\bar{C}_{P,P}$	0.52 (cal/g · K)
\bar{C}_P	0.273 (cal/g · K)
$\bar{\mu}$	4.244E-4 (g/cm · s)
\bar{E}_a	17760 (cal/mole)
\bar{T}_b	488.9 (K)
$\bar{T}_{P,i}$	300 (K)
\bar{R}_i	5 (cm)

위의 값들을 사용하여 구한 특성시간과 특성속도는 $\bar{t}^*=14.85(\text{sec})$, $\bar{v}^*=0.337(\text{cm/s})$ 이다.

Fig. 2는 무차원 시간 1.01×10^{-3} 일 때 각각의 입자 직경에 대한 반경방향 속도 분포를 비교 도시한 것이다. 속도는 입

자군 중심으로부터 증가하다가 입자군의 경계 즉 $r=1.0$ 을 지난 후 감소함을 보여 주나 입자 직경이 75 μm 인 경우는 다른 경우에 비하여 크기가 커서 열 용량 또한 크므로 이 시점에는 입자가 분해온도에 도달하지 않아 휘발성분이 생성되지 않으므로 속도가 0임을 보여준다. 직경이 60 μm 의 경우 속도가 가장 크게 나타나는데, 이는 이 시점에는 열분해가 나타나는 세 경우들 모두 열분해 온도까지 온도가 상승했으므로 입자크기가 큰 즉 표면적이 크고 휘발성분을 많이 포함된 경우가 크기가 작은 입자에 비하여 더 많은 휘발성분을 방출하기 때문이다.

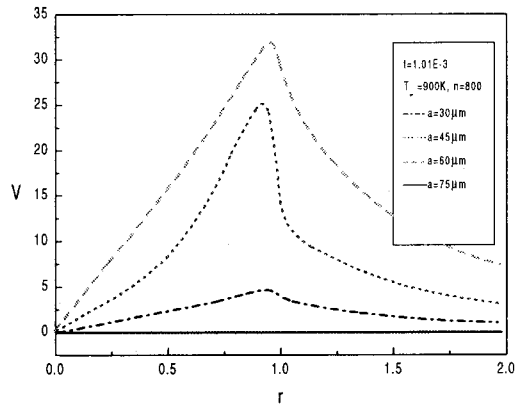


Fig. 2 Gas phase velocity distribution for various particle radius at $t=1.01E-3$

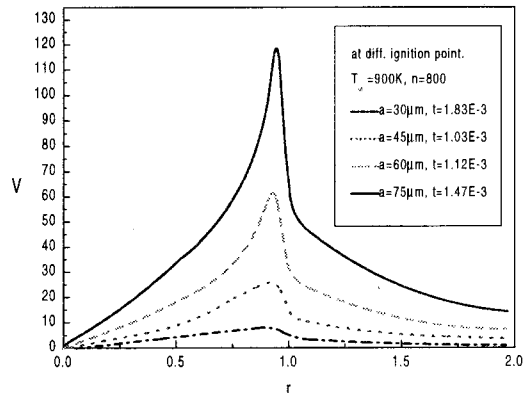


Fig. 3 Distributions of gas velocity for various particle size at different ignition point

Fig. 3은 여러 가지 입자크기에 대하여 점화순간에서의 반경방향 속도분포를 비교 도시한 것이다. 입자군내 입자들의 크기가 클수록 속도가 크며, 속도분포는 중심으로부터 증가했다가 입자군 경계근처에서 감소하는 경향을 나타낸다. 이때 점화위치는 입자군내 약 $r = 0.9$ 이며 $30 \mu\text{m}$ 의 경우를 제외하면 입자가 작을수록 반응이 빨리 시작되어 점화지연시간이 짧음을 알 수 있는데, $30 \mu\text{m}$ 의 경우는 휘발성분의 양이 다른 경우에 비하여 적으므로 점화가 늦은 것으로 판단된다.

Fig. 4는 무차원 시간이 1.21×10^{-3} 인 경우 즉 반응이 시작되지 않은 시점의 수밀도 변화에 따른 무차원 온도분포를 비교 도시한 것이다. 입자군의 외부는 초기온도로 온도가 일정하며 내부는 초기 온도보다 낮은 온도를 나타내며 수밀도가 클수록 온도는 낮다. 이는 초기 상온의 입자들을 열분해온도까지 가열하는데 필요한 열을 주위 기체로부터 공급받기 때문이며, 수밀도가 큰 경우가 작은 경우보다 입자들의 온도 상승에 필요한 열을 많이 공급하여 기체상 온도가 낮아지는 것으로 해석된다.

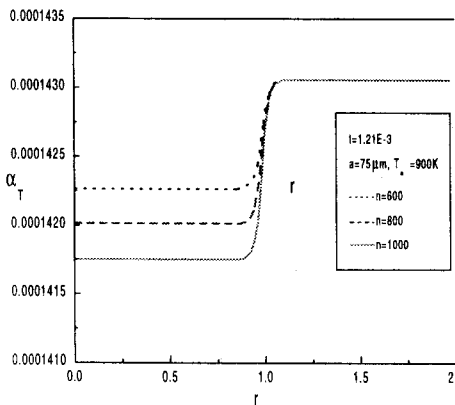


Fig. 4 Temperature distributions of gas phase for various number density at $t=1.21E-3$

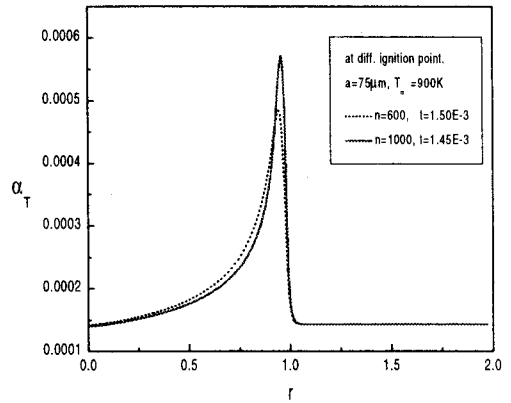


Fig. 5 Gas phase temperature distribution for various number density at different I.P.

Fig. 5는 각각의 수밀도에 대한 점화순간에서의 온도분포를 비교 도시한 것이다. 온도는 중심으로부터 급격히 상승하여 점화위치에서 최고온도를 나타낸 후 급격히 감소함을 볼 수 있으며, 수밀도에 의한 온도차이는 크지 않다. 또한 수밀도가 1000개/cc 인 경우가 600개/cc인 경우보다 점화시간은 약간 짧고 점화위치는 약간 외곽임을 알 수 있다. 이는 조밀한 수밀도로부터 생성되는 더 많은 휘발분으로 인하여 점화에 필요한 가연성 혼합기가 일찍 입자군 외부 가까이에서 생성되므로 나타나는 현상으로 해석된다.

Fig. 6은 외부온도 900K, 수밀도 800 개/cc이고 입자 직경이 $75 \mu\text{m}$ 일 때 점화전과 점화시점에서의 무차원 연료농도와 산소농도분포를 도시한 것이다. 연료농도 Y_F 를 보면 시간에 따라 연료농도가 증가하다가 무차원 시간 $t=1.41E-3$ 부터 반응으로 인하여 약간의 기울기 변화가 생기며 점화순간인 $t=1.47E-3$ 에서는 집단 경계의 약간 안쪽구간에서 급격한 감소를 보인다. 산소농도 Y_O 분포를 보면 초기에 중심으로부터 입자군 외부로 선형

적으로 증가하던 것이 시간이 지남에 따라 휘발분의 생성으로 인하여 혼합기내 산소의 농도는 약간씩 감소하다 점화순간 점화 위치에서 급격한 감소를 보여 준다. 즉 연료농도의 증가 감소와 산소 농도의 감소현상은 시간적으로 일치함을 볼 수 있다.

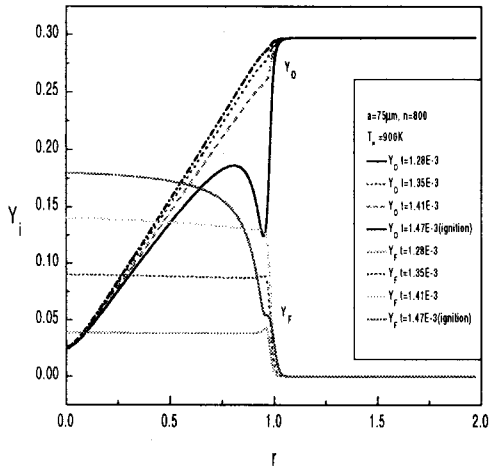


Fig. 6 Mass fraction distribution with time for given condition

본 연구에서는 초기조건으로 입자집단의 온도를 T_∞ 로 일정하게 하였으므로 점화지연기간은 입자의 온도상승-휘발분 방출-점화 까지의 시간으로 하였다.

Fig. 7은 수밀도가 600개/cc로 일정할 때 초기온도와 입자의 크기 변화에 따른 점화지연시간을 비교 도시한 것으로서 입자의 크기가 약 $50 \mu m$ 일 때 점화지연기간이 제일 짧으며 입자의 크기가 작거나 이보다 클 때는 점화지연기간이 증가함을 볼 수 있다. 이는 입자의 크기가 큰 경우에는 입자의 온도상승과 열분해 시간이 길어지게 되어 점화가 지연되며, 입자가 너무 작은 경우에는 입자의 온도상승과 열분해는 빠르나 방출되는 휘발성분의 양이 너무 적어서 반응으로 인한 온도상승이 미약하여 점화가 지연되는

것으로 해석된다. 이 결과는 미분탄의 집단점화에 대한 기존 연구의 결과와 경향이 일치한다^[11]. 또한 초기 온도가 높을수록 점화지연기간은 짧아짐을 알 수 있는데 이는 주위온도가 높을수록 온도상승과 휘발분 방출시간이 줄어들어 나타나는 현상으로 해석된다.

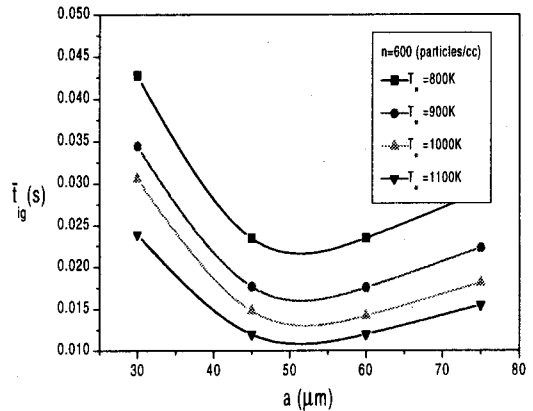


Fig. 7 Ignition delay for various particle radius and ambient temperature

Fig.8 는 초기온도가 일정할 때 입자의 크기와 수밀도의 변화에 따른 점화지연기간의 변화를 도시한 것이다. 수밀도가 증가하면 점화지연기간은 짧아지며 입자 크기가 $30, 45 \mu m$ 로 작을수록 그 경향이 더 크게 나타나고, 입자의 크기가 커질수록 그 경향은 약해짐을 볼 수 있다. 즉 가장 작은 $30 \mu m$ 의 경우는 수밀도증가에 따라 점화지연기간이 급격히 짧아지고, 가장 큰 $75 \mu m$ 의 경우에는 수밀도의 영향이 거의 없다. 이것은 입자가 아주 작은 경우는 수밀도가 높아질수록 휘발성분의 양을 늘리는데 유리하기 때문이고, 입자가 큰 경우는 수밀도가 작아도 휘발성분은 충분히 나오며, 너무 조밀해질 경우 오히려 초기에 입자군의 온도상승과 열분해에 더 시간이 필요해지

기 때문에 휘발성분이 많아져서 반응이 활발해지는 것을 상쇄시키기 때문이라 풀이된다.

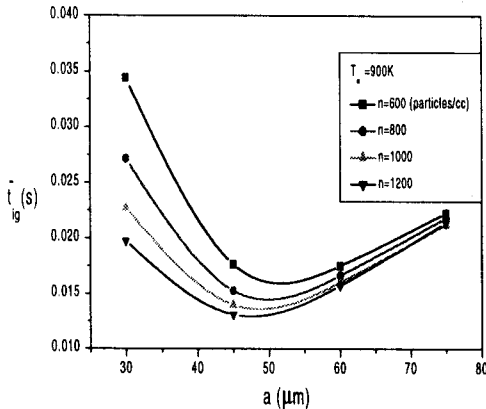


Fig. 8 Ignition delay for various particle radius and number density

4. 결론

수치 해석을 통하여 얻은 미분탄의 집단점화과정의 특성을 정리하면 다음과 같다.

1. 점화는 일반적으로 집단경계부근에서 일어난다.
2. 점화지연기간이 가장 짧아지는 특정한 입자크기가 존재한다.
3. 수밀도가 커질수록 점화는 빨라지는 경향이 있고, 이 경향은 입자의 크기가 작은 경우에 더욱 뚜렷하다. 또한 수밀도가 커질수록 더 좁은 영역에서만 반응이 활발하다. 따라서 입자의 크기가 작아지고 수밀도가 작아질수록 고립입자연소의 특성에 가까워지며 입자가 커지고 수밀도가 높아질수록 집단 연소로 천이된다.

4. 초기온도가 높을수록 점화는 빨라지며 반응은 더 넓은 구간에서 활발하다.
5. 속도는 집단 경계부근에서 항상 최대이며 점화시에는 초기온도가 높고 입자가 크며 수밀도가 높을수록 커진다.

참고문헌

- (1) Chiu, H. H., Kim, H. Y. and Croke, E. J., "Internal Group Combustion of Liquid Droplets," 19th Symp. (Int.) on Combustion, pp. 971-980, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1982
- (2) 김 호영, "액체 연료 액적군의 비정상 집단연소," 대한기계학회논문집, 제8권 제6호, pp 544-552, 1984.
- (3) Annamalai, K. and Amalingam, S. C., "Group Combustion of Char/Carbon Particles," Combust. Flame, Vol. 70, pp. 307-332, 1987.
- (4) 박용열, "액체연료 액적군의 집단," 대한기계학회 논문집 16권 12호 pp2376-2384, 1992
- (5) Faltsi-Saravelou, O., Wild, P., Sazhin, S.S. and Michel, J.E., "Detailed Modelling of a Swirling Coal Flame," Combust. Sci Technol. Vol. 123, pp. 1-21, 1997.
- (6) Peters, A.A.F. and Weber, R., "Modelling of Swirling Natural Gas and Pulverized Coal Flames with Emphasis on Nitrogen Oxides," IFRF Doc No F 36/Y/21D, 1993.
- (7) Kobayashi, H., Howard, J. B. and Sarofim, A. F., "Coal Devolatilization at High Temperature," 16th Symp. (Int.) on Combustion, pp. 411-425, The Combustion Institute, Pittsburgh,

- 1976.
- (8) Fluent User's Guide, ver. 4.3, Fluent Inc., 1995.
 - (9) Kuzman, "Handbook of Thermodynamic Tables and Charts," Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
 - (10) Archie W. Culp, "Principles of Energy Conversion," 2nd edition, McGraw-Hill, 1991.
 - (11) Annamalai, K. and Ryan, W. and Dhanapalan, S., "Interactive Process in Gasification and Combustion. Part III: Coal/Char Partile Arrays, Streams and Clouds," Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 20. pp. 546, 1994.