

미분탄 입자들의 배열에 따른 연소특성

조종표* · 김호영** · 정진택**

Combustion Characteristics of Coal Particle Array

Chong Pyo Cho, Ho Young Kim and Jin Taek Chung

ABSTRACT

The burning characteristics of interacting coal particles in a convective flow are numerically investigated at various Reynolds numbers. The transient combustion of 2-dimensionally arranged particles, both the fixed particle distances of 5 radii to 20 radii horizontally and 3 radii to 24 radii vertically, is studied.

The results obtained from the present numerical analysis reveal that the transient flame configuration and retardation of particle temperature augmentation with the horizontal or vertical particle spacing substantially influence devolatilization process and carbon conversion ratio of interacting particles. Volatile release and carbon conversion ratio of the second particle with decreasing horizontal and vertical particle spacing decrease gradually, whereas those of the first particle with decreasing vertical particle spacing increases due to flow acceleration. When the vertical particle spacing is smaller than $6R_0$, volatile release and carbon conversion ratio of the second particle decrease greatly due to reduction of flame penetration depth.

Key Words : devolatilization, carbon conversion ratio, horizontal particle spacing, vertical particle spacing

기 호 설 명

D	horizontal particle spacing(D'/R_0)	하첨자
D_a	Damköler number	f flame
H	vertical particle spacing(H'/R_0)	g gas phase
\dot{W}_m''	char oxidation rate	o oxygen or initial condition
\dot{W}_n	devolatilization rate	p particle

1. 서 론

석탄의 연소는 주로 화염의 안정화 및 연소 효

율의 증대를 위하여 미분탄 연소로 이루어지고 있다. 실제 미분탄 연소기에서는 직경이 100 μm 이하의 미분탄이 버너 노즐로부터 분사된 후 착화 연소된다. 이때 착화 특성과 연소 상태는 유동장 내의 미분탄 분포상태, 즉 입자의 크기 및 수밀도 분포에 따라 달라진다. 단일 미분탄 입자의 연소 과정은 휘발성분 방출과 연소에 이은 고정 탄소의 표면연소로 이루어지는데 이에 대한

* 고려대학교 기계공학과 대학원

† thermoch@korea.ac.kr

** 고려대학교 기계공학과

모델 및 연구는 많이 보고 되고 있다[1-5]. 그러나 실제 연소기의 고부하 상태에서 분사되어진 조밀한 분포상태의 입자들은 미분탄 입자간의 상호작용으로 인하여 단일 입자의 거동과 다르다.

본 연구의 목적은 대류환경에서 선형적으로 배열된 미분탄 입자들의 연소 거동을 규명하고, 입자간의 수평거리, 수직거리 그리고 Reynolds 수가 탈휘발화 및 탄소 변환율에 미치는 영향을 단일 입자의 그것들과 비교 분석하는 것이다.

2. 이론해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 미분탄 입자들이 2차원 선형적으로 배열되어 연소하는 경우를 해석하였다. 입자들은 미소중력 하에서 연소한다고 가정하였기 때문에 자연대류의 영향은 고려하지 않았다. 기체상에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

Gas phase :

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_i - \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) u_j \right\} \\ = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_j - \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) h \right\} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \sum_{n=1}^N \Delta h_n \dot{w}_n \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_j - \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) Y_k \right\} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + \sum_{n=1}^N \nu_{kn} \dot{w}_n \quad (4)$$

상태방정식은 Peng-Robinson equation[6]을 이용하였다. 본 연구에서는 선형적으로 배열된 미분탄 입자들의 주위 환경 변화가 탈휘발화 및 차연소에 미치는 영향에 초점을 맞추기 위하여 입자 내부의 온도는 시간에 따라 변화하지만 균일하다고 가정하였다. 고체상에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} = \dot{m}_{c,p} + \dot{m}_{v,p} = - \int \sum \dot{W}_m dA - \sum \dot{W}_n \quad (5)$$

$$\begin{aligned} m_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \int \sum \Delta h_m \dot{W}_m dA - \sum \Delta h_n \dot{W}_n \\ + \int k \frac{\partial T}{\partial r} dA + \epsilon_p \sigma (T_f^4 - T_p^4) \end{aligned} \quad (6)$$

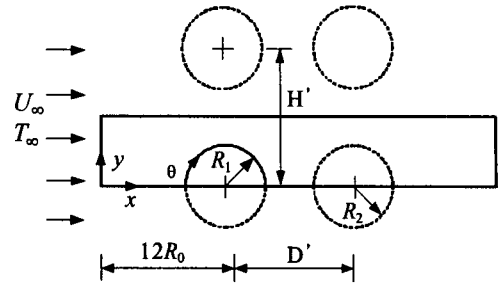


Fig. 1 Schematic of coal particles burning in a convective flow

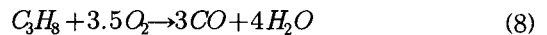
석탄의 종류에 따라 휘발분의 조성성분도 다양하나 본 연구에서는 프로판(C₃H₈)을 휘발성분으로 하였으며 석탄은 Illinois #6을 대상으로 하였으며 사용된 석탄의 상태량은 Table 1에 나타내었다. 휘발화 모델은 단일 반응물 모델(single kinetic rate model)을 이용하였으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\dot{m}_{v,p} = \frac{dV}{dt} = - k_1 (V - V_0) \quad (7)$$

여기서 $k_1 = B_1 \exp(-E/RT_p)$ 이다.

입자의 내부가 균일하다고 가정하였지만, 입자 표면에서 반응물이 균일하지 않기 때문에 입자 표면에서 산화제 성분들의 농도는 균일하지 않으며, 탈휘발화 반응에 의한 반응열은 418.5 kJ/kg [1,8]으로 계산하였다.

기체상에서 휘발분의 연소는 2단계 Arrhenius 반응모델[7]을 이용하여 다음과 같이 반응률을 계산하였다.



$$\dot{w}_1 = 10^{12} [C_3H_8]^{0.1} [O_2]^{1.65} \exp(-30/RT) \quad (10)$$

$$\dot{w}_2 = 10^{14.6} [CO][O_2]^{0.25} [H_2O]^{0.5} \exp(-40/RT) \quad (11)$$

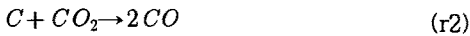
Table 2 Properties of coal used

Proximate analysis (daf basis, wt.%)	
Fixed carbon	59.4
Volatile matter	40.6
Ultimate analysis (wt.%)	
C	79.3
H	5.1
N	1.6
S	2.5
O	11.5
Density(kg/m ³)	1340

Table 2 Reaction kinetic constants

Chemical process	$k = B \exp(-E/RT)$		
	B	unit	E(J/mol)
Devolatilization reaction	2.42×10^3	s^{-1}	2.33×10^4
Char reaction 1	1.225×10^3	m/s	9.977×10^4
Char reaction 2	1.813×10^3	m/s	1.089×10^5
Char reaction 3	7.375×10^3	m/s	1.380×10^5

미분탄 입자 표면에서 차 반응은 다음과 같이 3 종류를 이용하였다.



위의 3 종류 표면 반응에 대한 차 반응률은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{m}_{c,p}^1 = -\frac{1}{\beta_{c1}} \int \rho_s Y_{o,s} B_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_p}\right) dA \quad (12)$$

$$\dot{m}_{c,p}^2 = -\frac{1}{\beta_{c2}} \int \rho_s Y_{o,s} B_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_p}\right) dA \quad (13)$$

$$\dot{m}_{c,p}^3 = -\frac{1}{\beta_{c3}} \int \rho_s Y_{o,s} B_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_p}\right) dA \quad (14)$$

$$\dot{m}_{c,p} = \dot{m}_{c,p}^1 + \dot{m}_{c,p}^2 + \dot{m}_{c,p}^3$$

본 연구에서 탈휘발화 및 탄소 표면 반응들에 대한 반응 상수들은 Table 2에 나타내었다[9-10].

2.2 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 온도가 1250 K, 압력이 10 기압인 공기 중에 분사되어 공기와 일정한 상대속도로 탈휘발화 및 차 연소하는 고정된 입자들을 대상으로 하였다. 탈휘발화 반응은 600 K 이하에서 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 미분탄 입자의 초기온도는 600 K, 직경은 80 μm 로 하였다. 입자에 대한 질량 및 에너지 보존방정식의 해는 기체상 방정식에 대한 경계조건으로 이용되며, 탈휘발화율은 입자표면에서 기체상으로 휘발성분의 질량유속을 결정하는데 이용된다.

2.3 수치해석

기체 및 액체상의 지배방정식은 유한 체적법을 바탕으로 이산화하였고 유동장계산은 엇갈림 격자계, implicit 방법, 그리고 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다. 대류 및 확산유속은 power law scheme을 이용하였다. Poisson계 방정식을 이용한 타원형 격자 생성법을 적용하여 액체상에 대한 격자는 25×51 , 그리고 기체상은 주유동 방향

으로 301 개, 수직방향으로 25 개를 기준으로 최대 59 개의 비균일 격자계를 구성하였다. 전달방정식은 일반좌표계로 변환한 다음 균일한 계산영역에 대해 계산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 Re에 따른 영향

본 연구에서는 입자에 대한 Re가 5~20인 조건 하에서 입자간의 거리가 수평적으로 5~20 R_0 , 수직적으로 3~24 R_0 의 범위에서 연소하는 경우를 해석의 대상으로 하였다. 연소하는 미분탄 입자들의 비정상 거동을 해석하기 위한 대류 시간 척도는 $r_0/u_{g,\infty}$ 를 이용하였다.

대류환경에서 연소하는 액적과 유사하게 미분탄 입자 또한 Damköler 수와 Reynolds 수에 따라 화염의 형상이 변화하는데[11] 본 연구에서는 envelope 화염의 형태로 연소하는 미분탄 입자들을 대상으로 하였으며 계산 조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} Da = 0.5Re & (Re \leq 10) \\ Da = (Re-6)/8 & (Re > 10) \end{cases} \quad (15)$$

Figure 2는 몇 가지 Reynolds 수에 대해서 시간에 따른 미분탄 단일 입자의 온도변화를 나타낸 것이다. 입자의 온도는 대부분 화염영역으로부터 열전달에 의해 크게 상승하며 점근적인 온도에 가까워지면서 차 반응열에 의해 온도가 유지된다. Reynolds 수가 증가함에 따라 입자 주위의 고온영역으로부터 열전달이 증가하면서 점근적인 온도에 이르는 시간이 짧아진다.

미분탄 입자의 휘발성분은, Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼, 온도가 점근적인 값에 이르기 전인 10~15 ms에 대부분의 휘발성분이 방출되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 McLean et al.[5]의 실험결과와 잘 일치한다. 한편 보일러를 설계하는데 중요한 문제가 되는 미분탄 입자의 연소 시간을 결정하는데 있어 탄소 변환율(conversion ratio)이 판단 기준이 될 수 있으므로[4] 본 연구에서는 입자의 배열이 이에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다. 입자의 온도가 1000 K 이상으로 상승하면서 차 반응에 의한 탄소 변환율(conversion ratio)이 점차 증가한다.

탈휘발화 과정동안 표면 산소 농도는 최소값에 이르지만, Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼, 탈휘발화 과정이 끝나면서 입자 표면으로 전달되는 산소의 양이 증가하면서 차 반응에 의한 탄소 변환율은 급격히 상승한다. 이와 동시에 산소의 많은 양이 차 반응에 의해 CO와 CO²로 변환되면서 입자 표면에서의 산소 농도는 점근적인 값으로 유지된다.

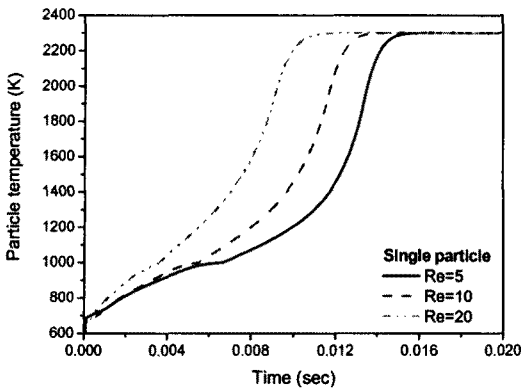


Fig. 2 Single particle temperature for various Reynolds numbers.

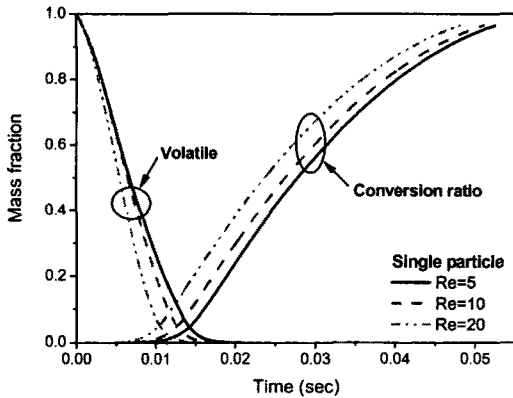


Fig. 3 Volatile release and carbon conversion ratio of single particle for various Reynolds numbers.

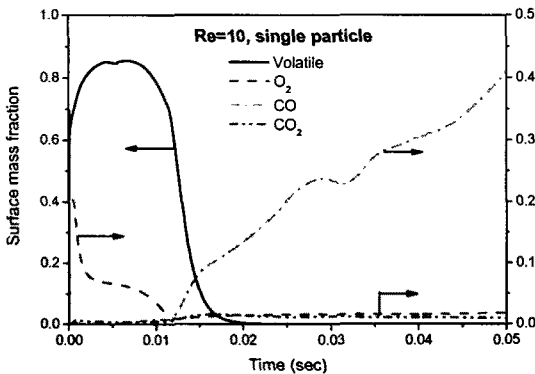


Fig. 4 Various surface mass fractions for single particle at Re=10.

3.3 수평거리(D)에 따른 영향

고온 공기 중에 분사된 미분탄 입자들은 초기에 개별적인 화염을 형성하고 이후 두 입자 사이에 미연 휘발성분이 축적되면서 개별 화염은 단

일화염으로 합쳐진다. 두 번째 입자 주위엔 상대적으로 미연 휘발성분이 농후해지면서 주위 온도가 더 낮고 입자의 온도 상승이 지연된다. 입자간의 수평거리가 가까워짐에 따라 단일화염 효과가 빨리 일어나기 때문에 Fig. 5와 6에서 볼 수 있듯이 두 번째 입자의 온도 상승은 더욱 지연된다. Fig. 7과 8은 여러 가지 입자간의 수평거리에 대해서 두 번째 입자의 휘발성분 및 탄소 변환율의 변화를 나타낸다. 두 번째 미분탄 입자의 온도 상승 지연으로 인하여 휘발성분 방출 또한 감소한다. 이러한 지연 효과와 더불어 입자간의 거리가 가까워짐에 따라 두 번째 입자 표면으로 전달되는 산소의 양이 작지만 감소하면서 탄소 변환율의 상승 또한 지연된다.

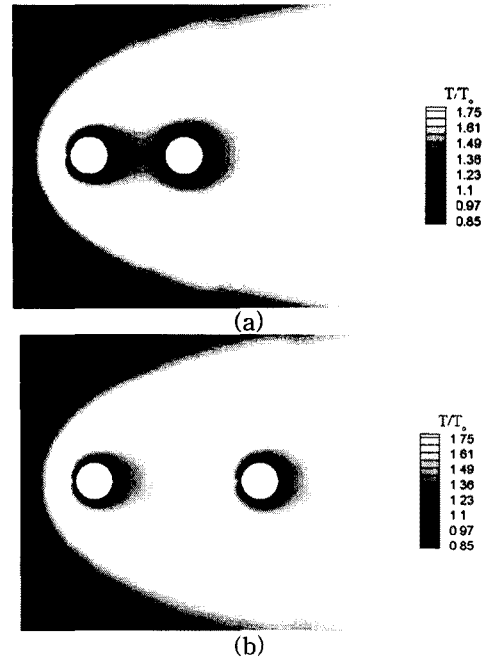


Fig. 5 Isotherms for burning particles at Re=10, H=24 and t=5.79ms: (a) D=5. (b) D=9.

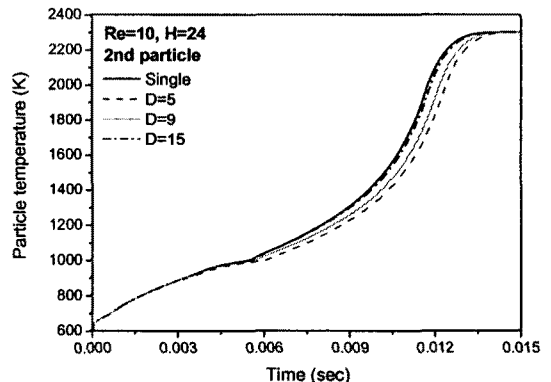


Fig. 6 Particle temperature of 2nd particle for various horizontal particle spacings.

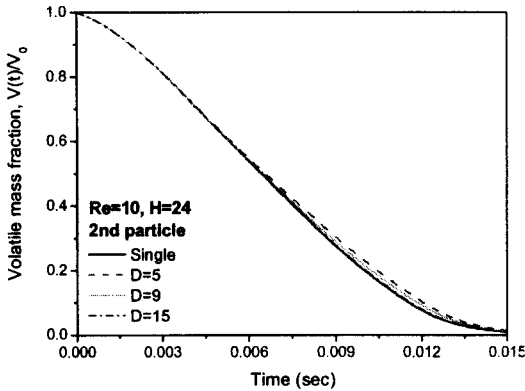


Fig. 7 Volatile mass fraction of 2nd particle for various horizontal particle spacings.

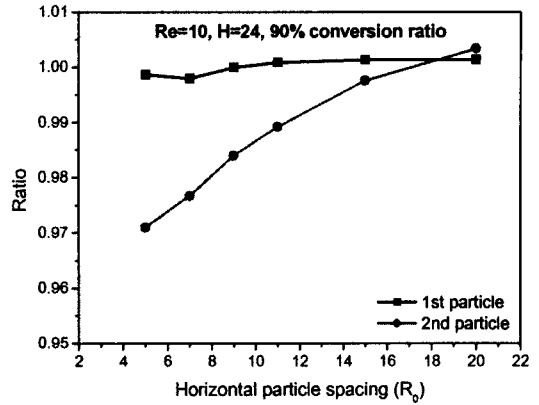


Fig. 10 Ratio of conversion ratio to that of single particle with horizontal particle spacing.

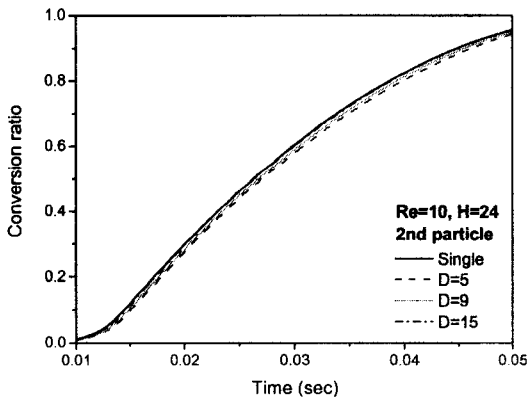


Fig. 8 Carbon conversion ratio of 2nd particle for various horizontal particle spacings.

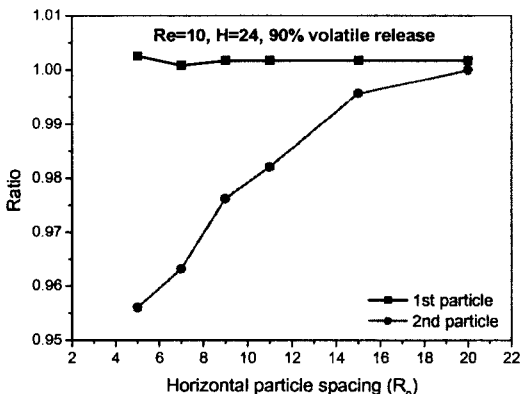


Fig. 9 Ratio of volatile release rate to that of single particle with horizontal particle spacing.

Figure 9와 10은 입자의 휘발성분 방출율과 탄소 변환율이 90%에 이르렀을 때, 단일 입자에 대한 이들의 비를 미분탄 입자간의 수평거리 변화에 대해서 나타낸 것이다. 수평거리가 감소함에 따라, 첫 번째 입자의 경우 큰 변화가 없지만, 두 번째 입자의 경우, 휘발성분 방출율은 대략 5%, 변환율은 3% 정도 감소한다.

3.4 수직거리(H)에 따른 영향

미분탄 입자간의 수직거리(H)가 감소함에 따라 벤추리 효과에 의하여 입자 주위의 유동은 가속되면서 첫 번째 입자로 전달되는 열 유속은 증가한다. 그러나 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 입자간의 수직거리가 감소함에 따라 두 번째 입자 주위의 화염은 매우 빠르게 쓸려나가고 첫 번째 입자 앞에 group envelope 화염이 형성되면서 산소성분은 이 화염영역에서 대부분 소모되어 화염 침투 깊이가 감소하게 된다.

화염 침투 깊이가 감소함에 따라 두 번째 입자로 전달되는 열은 더욱 감소하며 Fig. 12에서 보이는 것처럼 두 번째 미분탄 입자의 온도는 단일 입자에 비해 매우 더디게 상승한다.

Figure 13과 14는 여러 가지 입자간의 수직거리에 대하여 두 번째 입자의 휘발성분 방출량 및 변환율을 나타낸 것이다. 입자간의 수직거리가 감소함에 따라 형성된 group envelope 화염에 의해 온도가 더디게 상승하는 두 번째 입자는 휘발성분 방출과 탄소 변환율 또한 지연된다.

Figure 14와 15는 입자의 휘발성분 방출율과 탄소 변환율이 90%에 이르렀을 때, 단일 입자에 대한 이들의 비를 미분탄 입자간의 수직거리 변화에 대해서 나타낸 것이다.

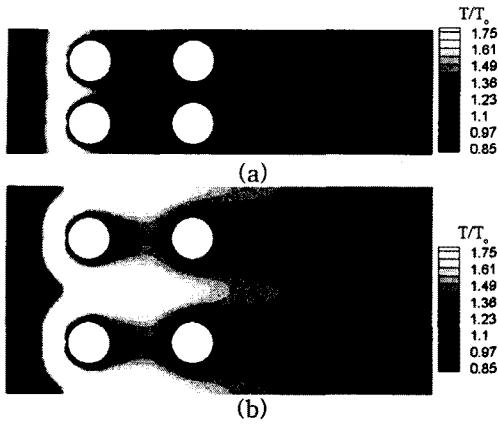


Fig. 11 Isotherms for burning particles at $Re=10$, $D=5$ and $t=8.11ms$: (a) $H=3$. (b) $H=5$.

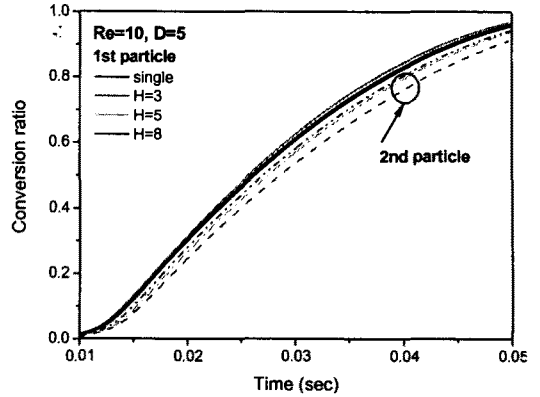


Fig. 14 Carbon conversion ratio of two particles for various vertical particle spacings.

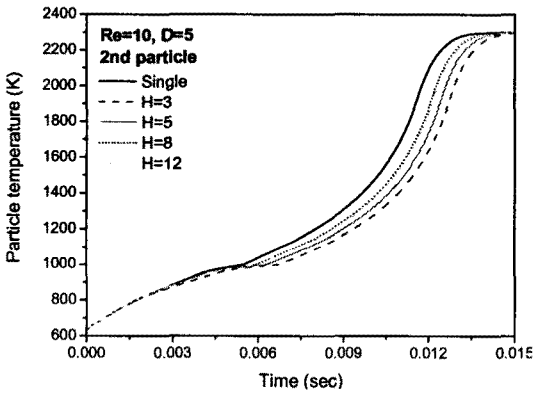


Fig. 12 Particle temperature of 2nd particle for various vertical particle spacings.

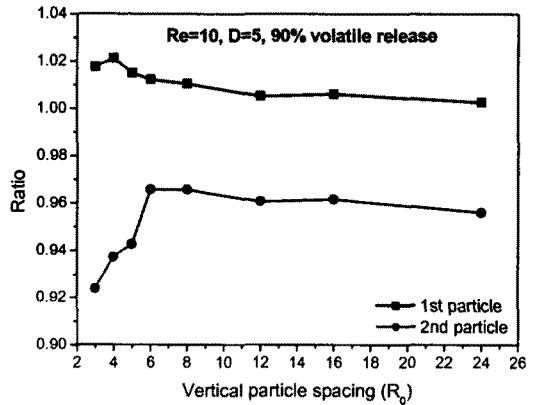


Fig. 15 Ratio of volatile release rate to that of single particle with vertical particle spacing.

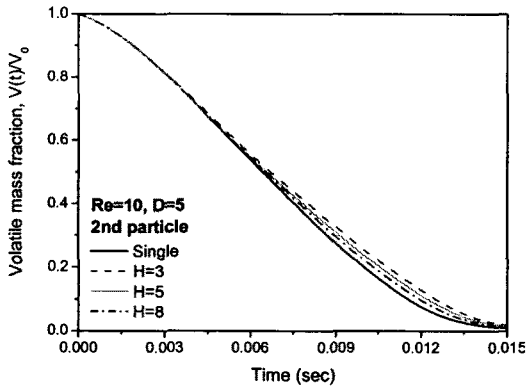


Fig. 13 Volatile mass fraction of 2nd particle for various vertical particle spacings.

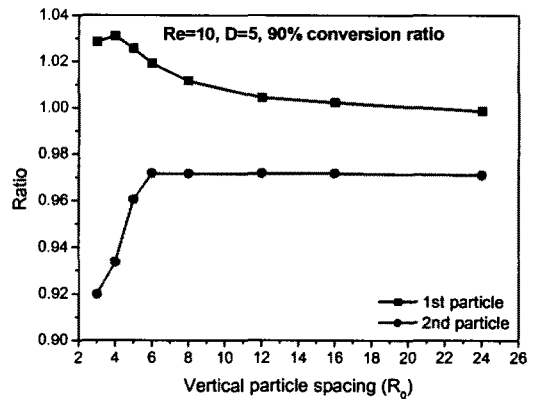


Fig. 16 Ratio of conversion ratio to that of single particle with vertical particle spacing.

수직거리(H)가 감소함에 따라, 첫 번째 입자의 경우, 유동 가속 효과에 의하여 휘발성분 방출율 및 탄소 변환율이 3% 정도 상승한다. 그러나, 두 번째 입자의 경우 group envelope 화염 효과로 인하여 휘발성분 방출율 및 탄소 변환율은 대략 3% 감소하는데, H가 6이하가 되면 화염 침투 깊이가 감소로 인하여 8%정도까지 감소한다.

4. 결 론

연소하는 미분탄 입자들의 배열에 대해서 Reynolds 수, 액적간의 수평거리 그리고 수직거리 변화가 탈휘발화 과정 및 탄소 변환율에 미치는 영향에 대하여 수치적으로 해석하였다. 미분탄 입자간의 거리는 입자의 연소 거동에 상당히 영향을 미치는 것으로 나타났다. 입자간의 수평거리(D')가 감소함에 따라 휘발성분의 축적 및 단일화염 형성으로 인하여 두 번째 입자의 휘발성분 방출율 및 탄소 변환율이 감소한다. 입자간의 수직거리(H')가 감소하는 경우, 첫 번째 입자는 유동의 가속 효과에 의하여 휘발성분 방출율 및 변환율이 다소 증가한다. 두 번째 입자의 경우 group envelope 화염 및 화염 침투 깊이가 감소로 인하여 휘발성분 방출율 및 변환율이 $6R_0$ 를 기준으로 더욱 감소한다.

후 기

본 연구는 연소기술센터(CERC)의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S.P. Musarra, T.H. Fletcher, S. Niksa and H.A. Dwyer, *Combust. Sci. and Tech.*, 45:289-307(1986)
- [2] N.C. Beck and A.N. Hayhurst, *Combust. Flame* 79:47-74(1990)
- [3] A. Makino, *Combust. Flame* 90:143-154 (1992)
- [4] R. He, T. Suda, T. Fujimori and J. Sato, *Int. J. Heat. Mass Transfer*, 46:3619-3627(2003)
- [5] W.J. McLean, D.R. Hardesty, and J.H. Pohl, *Eighteenth Symp. (Int.) on Combust., The Combustion Institute*, pp. 1239-1255(1981).
- [6] B.E. Poling, J.M. Prausnitz, and J.P. O'Connell, *The properties of gases and liquids*, McGraw Hill, New York, 2001.
- [7] C.K. Westbrook and F.L. Dryer, *Combust. Sci. and Tech.*, 27:31-43 (1981)
- [8] J.D. Freihaut, Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University(1980)
- [9] L.X. Zhou, *Combustion theory and chemical fluid dynamics*, Science Press, Moscow(1986).
- [10] Z.Q. Li, F. Wei and Y. Jin, *Chem. Eng. Sci.*, 58:5161-5171, 2003.
- [11] G.T. Tsai, J.T. Yang, *Combust. Sci. and Tech.* 96:1-21, 1994