

< 논문 >

미분탄 입자들의 배열이 미분탄 연소에 미치는 영향

조종표\* · 김호영† · 정진택\*\*  
 (2005년 5월 31일 접수, 2005년 11월 10일 심사완료)

Effects of Coal Particle Array on Coal Combustion

Chong Pyo Cho, Ho Young Kim and Jin Taek Chung

**Key Words:** Carbon Conversion Ratio(탄소 전환비), Devolatilization(탈휘발과정), Horizontal Particle Spacing(수평입자간격), Vertical Particle Spacing(수직입자간격)

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 4 radii to 24 radii vertically, is studied. The results obtained from the present numerical analysis indicate 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 increase 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 due to reduction of flame penetration depth and interference of oxygen diffusion by the first particle.

기호설명

- $D$  : 수평입자간격( $D/R_0$ ), 입자 직경
- $Da$  : Damköler 수
- $H$  : 수직입자간격( $H/R_0$ )
- $\dot{W}_m^*$  : Char 산화율
- $\dot{W}_n$  : 탈휘발률
- $\sigma$  : Boltzman 상수

하첨자

- f : 화염

- g : 기체상
- o : 산소, 초기조건
- p : 미분탄 입자

1. 서론

석탄의 연소는 주로 화염의 안정화 및 연소 효율의 증대를 위하여 미분탄 연소로 이루어지고 있다. 실제 미분탄 연소기에서는 직경이  $100\mu\text{m}$  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. 미분탄 입자의 연소 과정은 휘발분이 방출되는 탈휘발 과정(devolatilization)과 연소에 이은 잔류 char가 반응하는 char 반응과정으로 이루어지며, char 반응은 휘발분의 방출량, 조성 그리고 반응률 등의 탈휘발 특성에 의해 지배된다. 이에 대한 모델 및 연구는 많이 보고되고 있다.<sup>(1-7)</sup> 미분탄 입자의 연소

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
 E-mail : kimhy@korea.ac.kr  
 TEL : (02)3290-3752 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학과

에 대한 연구의 대부분이 단일 입자를 대상으로 하고 있으나, 실제 연소기의 고 부하 상태에서 분사되어진 조밀한 분포상태의 입자들은 미분탄 입자간의 상호작용으로 인하여 단일 입자의 거동과 다르다. 조밀하게 분포된 연소하는 미분탄 입자들의 상호작용을 정량적으로 규명하기 위해서는 미분탄의 2차원 배열과 같이 단순화가 요구된다. 한편 최근 연구에 따르면 상승된 압력조건에서 미분탄을 연소시킴으로써 탈휘발이 빨라지고 반응률이 증가되는 연소효율 증가뿐만 아니라 연소로 크기 감소 및 주변 설비 건설에 따른 경비를 절감할 수 있는 장점이 있으며,<sup>(8)</sup> 0.5~7.0 MPa의 다양한 가압 조건에 따른 미분탄 연소특성에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(9)</sup>

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

## 2. 이론해석

### 2.1 지배방정식

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

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

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

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

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

상태방정식은 Peng-Robinson 방정식<sup>(10)</sup>을 이용하였다. 본 연구에서는 선형적으로 배열된 미분탄 입자들의 주위 환경 변화가 탈휘발 및 char 연소에 미치는 영향에 초점을 맞추기 위하여 입자 내부의 온도는 시간에 따라 변화하지만 균일

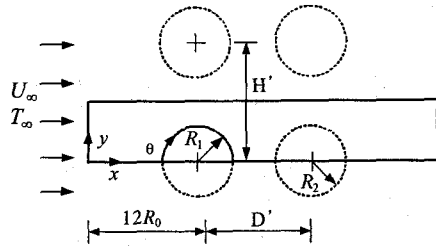


Fig. 1 Schematic of coal particles burning in a convective flow

Table 1 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 <sup>3</sup> )	1340

하다고 가정하였으며 입자와 화염면 방사율 (emissivity)은 1로 가정하였다.

고체상에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_{c,p} + \dot{m}_{v,p} = - \int \dot{w}_m'' dA - \sum \dot{W}_n \quad (5)$$

$$\begin{aligned} m_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \int \Delta h_m \dot{w}_m'' dA - \sum \Delta h_n \dot{W}_n \\ + \int k \frac{\partial T}{\partial r} dA + \epsilon_p \sigma (T_f^4 - T_p^4) \end{aligned} \quad (6)$$

석탄의 종류에 따라 휘발분의 조성성분도 다양하나 본 연구에서는 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)을 휘발분으로 하였으며 석탄은 미국 Illinois #6을 대상으로 하였으며 사용된 석탄의 상태량은 Table 1에 나타내었다.<sup>(2)</sup> 휘발화 모델은 단일 반응률 모델(single kinetic rate model)을 이용하였으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

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

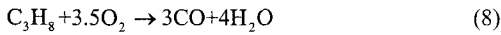
여기서  $k_1 = B_1 \exp(-E/RT_p)$  이다.

입자의 내부가 균일하다고 가정하였지만, 입자 표면에서 반응률이 균일하지 않기 때문에 입자 표면에서 산화제 성분들의 농도는 균일하지 않음

Table 2 Reaction kinetic constants

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

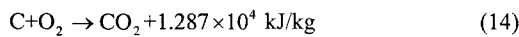
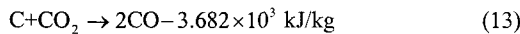
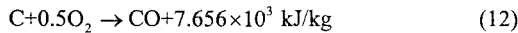
며, 탈휘발 반응에 의한 반응열은 418.5 kJ/kg<sup>(1,12)</sup>으로 계산하였다. 기체상에서 휘발분의 연소는 2 단계 Arrhenius 반응모델<sup>(11)</sup>을 이용하여 다음과 같이 반응률을 계산하였다.



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

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

미분탄 입자 표면에서 char 반응은 다음과 같이 3 종류를 이용하였다.<sup>(11)</sup>



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

$$\dot{m}_{c,p}^1 = -\frac{1}{\beta_{c1}} \int \rho_s Y_{O_2,s} B_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_p}\right) dA \quad (15)$$

$$\dot{m}_{c,p}^2 = -\frac{1}{\beta_{c2}} \int \rho_s Y_{O_2,s} B_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_p}\right) dA \quad (16)$$

$$\dot{m}_{c,p}^3 = -\frac{1}{\beta_{c3}} \int \rho_s Y_{O_2,s} B_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_p}\right) dA \quad (17)$$

$$\dot{m}_{c,p} = \dot{m}_{c,p}^1 + \dot{m}_{c,p}^2 + \dot{m}_{c,p}^3 \quad (18)$$

본 연구에서 탈휘발 및 탄소 표면 반응들에 대한 반응 상수들은 Table 2에 나타내었다.<sup>(13,14)</sup>

### 2.2 초기조건 및 경계조건

본 연구에서는 온도가 1250 K, 압력이 10 기압인 공기 중에 분사되어 공기와 일정한 상대속도로 탈휘발 및 char 연소하는 고정된 미분탄 입자들을 대상으로 하였다. 탈휘발 반응은 600 K 이

하에서 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 미분탄 입자의 초기온도는 600 K, 직경은 80 μm로 하였다. 입자에 대한 질량 및 에너지 보존방정식의 해는 기체상 방정식에 대한 경계조건으로 이용되며, 탈휘발률은 입자표면에서 기체상으로 휘발분의 질량유속을 결정하는데 이용된다.

### 2.3 수치해석

기체상의 지배방정식은 유한 체적법을 바탕으로 이산화하였고 유동장계산은 엇갈림 격자계, 내재적 방법, 그리고 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다. 대류 및 확산유속은 멱승 도식(power law scheme)을 이용하였다. Poission계 방정식을 이용한 타원형 격자 생성법을 적용하여 액체상에 대한 격자는 25×51, 그리고 기체상은 주유동 방향으로 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 연구의 수치 계산 코드에 대한 검증은 선행 연구<sup>(15,16)</sup>에서 실험결과들과 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 미분탄 입자에 대한 레이놀즈 수가 10~30인 조건 하에서 입자간의 거리가 수평방향으로 5~20R<sub>0</sub>, 수직방향으로 4~24R<sub>0</sub>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 레이놀즈 수에 따라 화염의 형태가 변화하는데<sup>(17)</sup> 본 연구에서는 envelope 화염의 형태로 연소하는 미분탄 입자들을 대상으로 하였으며 계산 조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} D_a = 0.5Re & (Re \leq 10) \\ D_a = (Re - 6)/8 & (Re > 10) \end{cases} \quad (19)$$

미분탄 입자가 연소하는 동안 입자의 크기 및 밀도 변화를 적절하게 고려하기 위해서 다음의 상관식<sup>(18)</sup>을 이용하여 입자의 직경을 매시간 수정

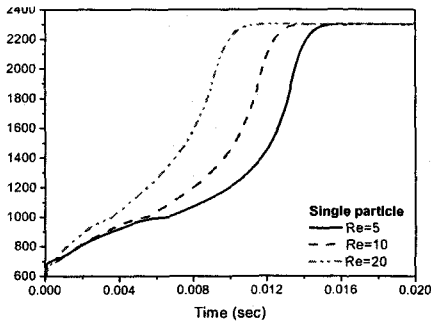


Fig. 2 Single particle temperature for various Reynolds numbers

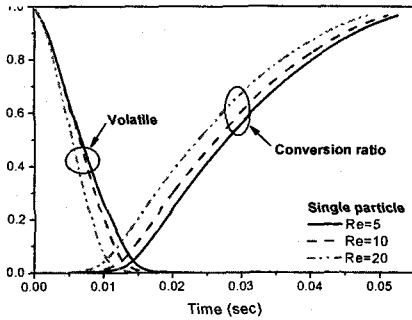


Fig. 3 Volatile release and carbon conversion ratio of single particle for various Reynolds numbers

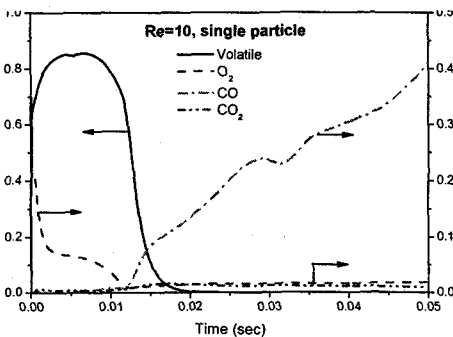


Fig. 4 Various surface mass fractions for single particle at Re=10

하였다.

$$\frac{D_p}{D_{p,o}} = (1-U)^{0.25}, U = 1 - m_p / m_{p,o} \quad (20)$$

Fig. 2는 몇 가지 레이놀즈 수에 대해서 시간에 따른 미분탄 단일 입자의 온도변화를 나타낸 것이다. 입자의 온도는 대부분 화염영역으로부터 열전달에 의해 크게 상승하며 점근적인 온도가 가까워지면서 미분탄 입자에서 방출되는 휘발분의 양은 점차 줄어들지만, char 반응열에 의해 온도가 유지된다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 입자 주위의 화염영역으로부터 열전달이 증가하면서 점근적인 온도에 이르는 시간이 짧아진다.

미분탄 입자의 휘발분은, Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼, 온도가 점근적인 값에 이르기 전인 10~15 ms에서 대부분의 휘발분이 방출되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 McLean 등<sup>(5)</sup>의 실험 결과와 잘 일치한다. 한편 보일러를 설계하는데 중요한 문제가 되는 미분탄 입자의 연소시간을 결정하는데 있어 고체 탄소 성분이 기체로 전환되는 탄소 전환비(conversion ratio)가 판단 기준이 될 수 있으므로<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 입자의 배열이 이에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다. 입자의 온도가 1000 K 이상으로 상승하면서 char 반응에 의한 탄소 전환비가 점차 증가한다. 레이놀즈 수의 증가에 따라 입자온도의 상승이 빨라지면서 탈휘발 과정이 빨라지고 이어서 char 반응에 의한 탄소 전환비의 상승이 빨라진다.

Fig. 4는 몇 가지 성분에 대해서 시간에 따른 미분탄 입자 표면에서의 질량분율 변화를 나타낸 것이다. 탈휘발 과정동안 방출되는 휘발분의 증가로 표면 산소 농도는 최소값에 이르지만, 탈휘발 과정이 끝나면서 입자 표면으로 전달되는 산소의 양이 증가되어 char 반응에 의한 탄소 전환비가 급격히 상승한다. 이와 동시에 산소의 많은 양이 char 반응에 의해 CO와 CO<sub>2</sub>로 변환되면서 입자 표면에서의 산소 질량분율은 낮은 값으로 유지된다.

### 3.2 수평거리(D)에 따른 영향

고온 공기 중에 분사된 미분탄 입자들은 탈휘발 과정 초기에 개별적인 화염을 형성하고 이후 두 입자 사이에 미연 휘발분이 축적되면서 개별 화염은 단일화염으로 합쳐진다. 두 번째 입자 주위엔 상대적으로 미연 휘발분이 농후해지면서 주위 온도가 더 낮고 입자의 온도 상승이 지연된

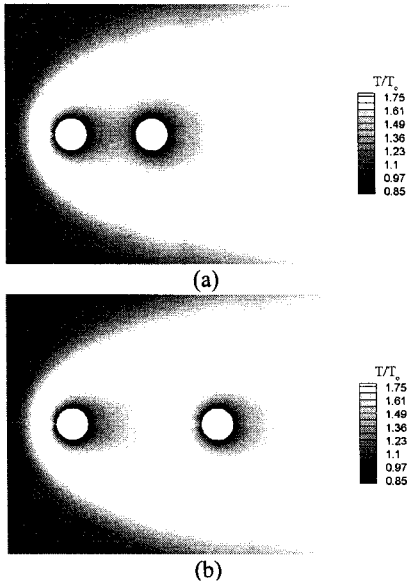


Fig. 5 Isotherms for burning particles at  $Re=10$ ,  $H=24$  and  $t=5.79$  ms: (a) $D=5$ , (b) $D=9$

다. Fig. 5는 레이놀즈 수가 10일 때 입자간의 수평거리가 5와 9인 경우의 화염형태를 나타내고 있다. 입자간의 수평거리가 가까워짐에 따라 단일화염 효과가 빨리 일어나게 되고, 이로 인해 Fig. 6에서 보이는 것처럼, 두 번째 입자의 온도 상승은 단일 입자에 비해 더욱 지연된다.

Fig. 7과 8은 두 번째 미분탄 입자에 대해서 미분탄 입자의 시간에 따른 휘발분 방출률과 탄소 전환비가 90%에 이르렀을 때, 단일 입자에 대한 이들의 비를 레이놀즈 수와 미분탄 입자간의 수평거리 변화에 대해서 나타낸 것이다. 두 번째 입자의 휘발분 방출률은 입자의 온도 상승 지연으로 인하여 수평거리가 감소함에 따라 상대적으로 5% 정도 감소한다. 탄소 전환비는 수평거리가 감소함에 따라 그리고 레이놀즈 수가 증가함에 따라 3% 정도 감소한다. 이처럼 탄소 전환비의 경우 레이놀즈 수에 따른 영향이 상대적으로 큰 것은 첫 번째 입자의 char 반응에 의한 CO성분이 두 번째 입자 주위로 전달되면서 산소성분의 확산을 방해하기 때문이다. 두 번째 입자와 달리, 첫 번째 미분탄 입자의 경우, 입자간의 수평거리 변화에 따른 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

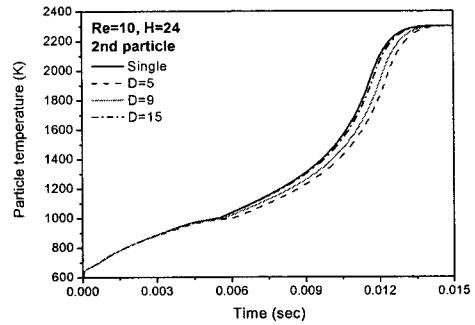


Fig. 6 Particle temperature of 2<sup>nd</sup> particle for various horizontal particle spacings

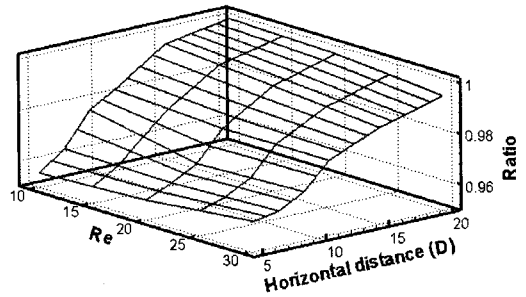


Fig. 7 Ratio of volatile release rate of 2<sup>nd</sup> particle to that of single particle with horizontal particle spacing ( $H=24$ )

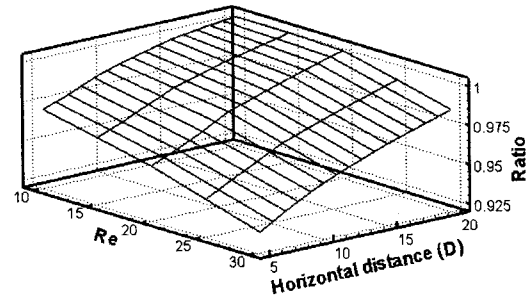


Fig. 8 Ratio of carbon conversion ratio of 2<sup>nd</sup> particle to that of single particle with horizontal particle spacing ( $H=24$ )

### 3.3 수직거리(H)에 따른 영향

미분탄 입자간의 수직거리(H)가 감소함에 따라 벤츄리 효과에 의하여 입자 주위의 유동은 가속되면서 첫 번째 입자로 전달되는 열 유속은 증가한다. 그러나 Fig. 9에서 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 침투깊이가 감소하게 된다. 또한 화염 침투깊이의 감소로

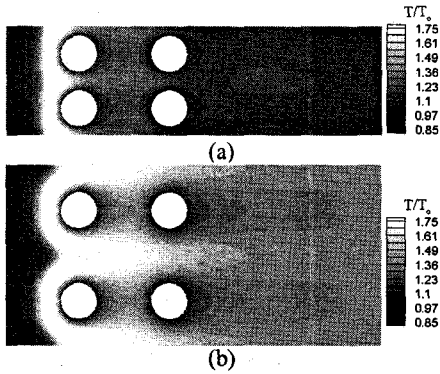


Fig. 9 Isotherms for burning particles at  $Re=10$ ,  $D=5$  and  $t=8.11$  ms: (a) $H=3$ , (b) $H=5$

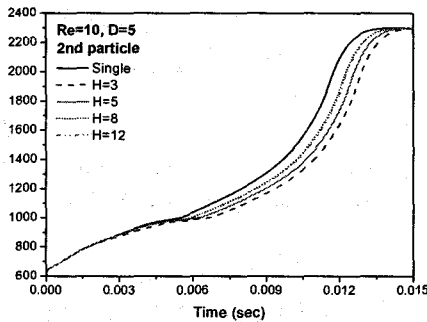


Fig. 10 Particle temperature of 2<sup>nd</sup> particle for various vertical particle spacings

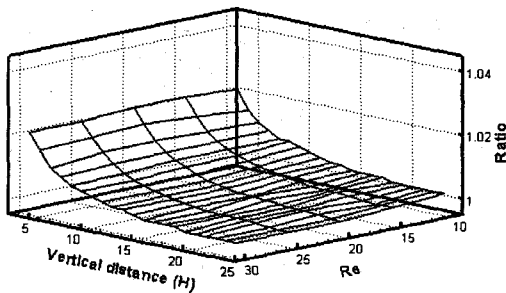


Fig. 11 Ratio of volatile release rate of 1<sup>st</sup> particle to that of single particle with vertical particle spacing ( $D=15$ )

인하여 두 번째 미분탄 입자 주위의 온도는 더욱 낮아지며 두 번째 입자로 전달되는 열은 더욱 감소하게 된다.

Fig. 10은 레이놀즈 수가 10, 입자간 수평거리 ( $D$ )가 5일 때 입자간의 수직거리 변화에 따른 두 번째 입자의 온도변화를 나타낸 것이다. 수직거리 감소에 따른 화염 침투깊이의 감소로 인하여

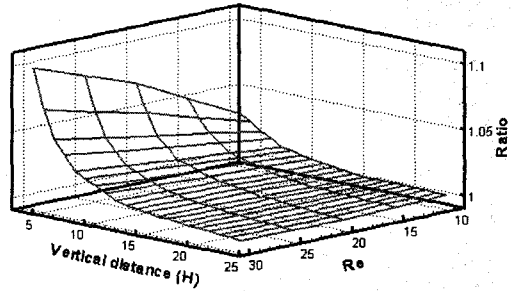


Fig. 12 Ratio of carbon conversion ratio of 1<sup>st</sup> particle to that of single particle with vertical particle spacing ( $D=15$ )

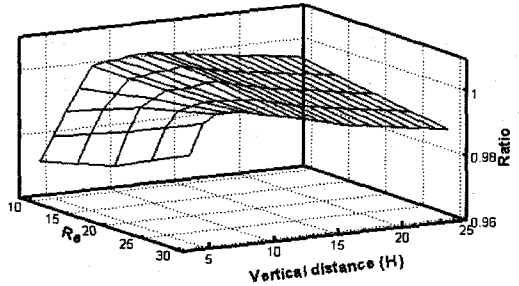


Fig. 13 Ratio of volatile release rate of 2<sup>nd</sup> particle to that of single particle with vertical particle spacing ( $D=15$ )

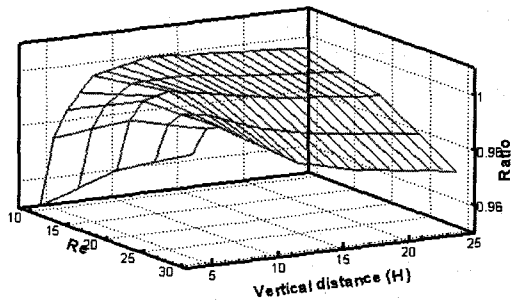


Fig. 14 Ratio of conversion ratio of 2<sup>nd</sup> particle to that of single particle with vertical particle spacing ( $D=15$ )

Table 3 Coefficients of correlation

Particle		$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	Range of H
1st particle	Devolatilization rate	1.0389	-0.0020	-0.0109	0.0002	$4 \leq H \leq 24$
	Carbon conversion ratio	1.0588	0.0134	-0.0334	0.0007	$4 \leq H \leq 24$
2nd particle	Devolatilization rate	0.8192	0.0206	0.0414	0.0216	$4 \leq H \leq 6$
		0.9422	-0.0014	-0.0100	0.0318	$6 < H \leq 24$
	Carbon conversion ratio	0.8429	0.0202	0.0293	0.0185	$4 \leq H \leq 6$
		0.9883	-0.0217	-0.0086	0.0331	$6 < H \leq 24$

단일 입자에 비해 입자의 온도 상승이 상당히 지연되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11과 12는 시간에 따른 미분탄 입자의 휘발분 방출률과 탄소 전환비가 90%에 이르렀을 때, 첫 번째 입자에 대해서 단일 입자에 대한 이들의 비를 레이놀즈 수와 미분탄 입자간의 수직거리 변화에 대해서 나타낸 것이다. 이들 그래프는 입자간의 수평거리에 따른 상호작용이 비교적 적은 D=15를 대상으로 한 것이다. 첫 번째 입자의 경우, 수직거리(H)가 감소함에 따라, 유동 가속 효과에 의하여 휘발분 방출률은 2% 정도 상승한다. 또한 탄소 전환비는 레이놀즈 수 증가에 따라 10% 가까이 더욱 상승한다. 이러한 이유는, 미분탄 입자 연소 과정의 초반에 대부분의 휘발분이 방출되는 탈휘발 과정과 달리, 탈휘발 과정 이후에 입자간의 수직거리 감소에 따른 유동가속 효과로 인하여 입자로 공급되는 산소의 양이 증가하면서 char 연소에 의한 탄소 전환비가 증가하기 때문이다.

Fig. 13과 14는 시간에 따른 미분탄 입자의 휘발분 방출률과 탄소 전환비가 90%에 이르렀을 때, 두 번째 입자에 대해서 단일 입자에 대한 이들의 비를 레이놀즈 수와 미분탄 입자간의 수직거리 변화에 대해서 나타낸 것이다. 첫 번째 입자에 의해 입자의 온도 상승 지연 및 산소 확산 방해로 인하여 단일 입자에 비해 2~3%정도 감소했던 휘발분 방출률 및 탄소 전환비는 입자간의 수직거리가 감소함에 따라 유동 가속 효과로 다소 회복이 된다. 그러나 수직거리가 6이하가 되면 group envelope 화염의 침투깊이 감소에 의한 효과가 크게 작용하면서 3~8%정도까지 감소한다. 지금까지, 미분탄 입자들의 배열이 미분탄의 탈휘발률 및 탄소 전환비에 미치는 영향을 조사하기 위해서, 레이놀즈 수, 입자간의 수평거리 그리고 수직거리를 함수로 하여 여러 가지 경우에 대

해서 계산을 수행하였다. 상호작용하는 미분탄 입자들의 단일 입자에 대한 탈휘발률 및 탄소 전환비는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} (\dot{V}_1 \text{ or } \dot{V}_2) / \dot{V}_{\text{sin}} \\ (CR_1 \text{ or } CR_2) / CR_{\text{sin}} \end{aligned} \right\} = C_1 (\text{Re})^{C_2} D^{C_3} H^{C_4} \quad (21)$$

위의 식에서  $\dot{V}$  은 탈휘발률을, CR 은 탄소 전환비를 나타내며, 하첨자 1과 2는 각각 첫 번째 입자와 두 번째 입자를 의미한다. 위 식의 계수들은 Table 3에 나타내었으며, 위 식은 미분탄 단일 입자를 통해서 선형적으로 배열된 미분탄 입자들의 탈휘발률 및 탄소 전환비를 예측하기 위한 편리한 수단을 제공한다.

#### 4. 결론

연소하는 미분탄 입자들의 배열에 대해서 레이놀즈 수, 입자간의 수평거리 그리고 수직거리 변화가 탈휘발 과정 및 char 연소에 의한 탄소 전환비에 미치는 영향에 대하여 수치적으로 해석하였다. 미분탄 입자간의 거리는 입자의 연소 거동에 상당히 영향을 미치는 것으로 나타났다.

입자간의 수평거리(D)가 감소함에 따라 단일 화염 형성 및 첫 번째 입자에 의한 산소 확산 방해로 인하여 두 번째 입자의 휘발분 방출률 및 탄소 전환비가 단일 입자에 비해 감소한다.

미분탄 입자간의 수직거리(H)가 감소하는 경우, 첫 번째 입자는 유동의 가속 효과에 의하여 휘발분 방출률 및 탄소 전환비는 다소 증가한다. 두 번째 입자의 경우 group envelope 화염의 침투깊이 감소에 의한 입자온도 상승 지연 및 첫 번째 입자에 의한 산소 확산 방해로 인하여 휘발분 방출률 및 탄소 전환비는 단일 입자에 비해 감소하며 수직거리가 6일 때를 기준으로 더욱 감소한다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Musarra, S. P., Fletcher, T. H., Niksa, S. and Dwyer, H. A., 1986, "Heat and Mass Transfer in the Vicinity of a Devolatilizing Coal Particle," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 45, pp. 289~307.
- (2) Beck, N. C. and Hayhurst, A. N., 1990, "The Early Stages of the Combustion of Pulverized Coal at High Temperatures I : The Kinetics of Devolatilization," *Combust. Flame*, Vol. 79, pp. 47~74.
- (3) Makino, A., 1992, "An Approximate Explicit Expression for the Combustion Rate of a Small Carbon Particle," *Combust. Flame*, Vol. 90, pp. 143~154.
- (4) He, R., Suda,, T., Fujimori, T. and Sato, J., 2003, "Effects of Particle Sizes on Transport Phenomena in Single Char Combustion," *Int. J. Heat. Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3619~3627.
- (5) McLean, W. J., Hardesty, D. R. and Pohl, J. H., 1981, "Direct Observations of Devolatilizing Pulverized Coal Particles in a Combustion Environment," *18th Symp. (Int.) on Combust.*, The Combustion Institute, pp. 1239~1255.
- (6) Choi, S. M., 1990, "Observation of Volatile Cloud Formation During the Early Stages of Pulverized Coal Combustion," *KSME int. J.*, Vol. 4, No. 1, pp. 71~77.
- (7) Cho, H. C., Park, J. K. and Shin, H. D., 1999, "Effect of Heating Rate on the Behavior of the Flame Front in the Pulverized-Coal Flame," *Trans. of the KSME B*, Vol. 23, No. 5, pp. 687~694.
- (8) Liakos, H. H., Theologos, K.N., Boudouvis, A.G. and Markatos. N.C.. 2001. "The Effect of Pressure on Coal Char Combustion," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 917~928.
- (9) Niksa, S., Liu, G. and Hurt, R. H., 2003, "Coal Conversion Submodels for Design Application at Elevated Pressures. Part I : Devolatilization and Char Oxidation," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 29, pp. 425~477.
- (10) Poling, B. E., Prausnitz, J. M. and O'Connell, J. P., 2001, "The Properties of Gases and Liquids," McGraw Hill, New York.
- (11) Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., 1981, "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 27, pp. 31~43.
- (12) Freihaut, J. D., 1980, "A Numerical and Experimental Investigation of Rapid Coal Pyrolysis," Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University.
- (13) Zhou, L. X., 1986, "Combustion Theory and Chemical Fluid Dynamics," Science Press, Moscow.
- (14) Li, Z. Q., Wei, F. and Jin, Y., 2003, "Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion and No Formation," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, pp. 5161~5171.
- (15) Cho, C. P. and Kim, H. Y., 2003, "The Effects of Droplet Arrangement on the Vaporization and Combustion Characteristics of Liquid Fuel Droplets," *J. of The Korean Society of Combustion*, Vol. 8, No. 2, pp. 17~26.
- (16) Kim, H. Y., Cho, C. P. and Chung, J. T., 2005, "Correlation of Burning Rate of the Interacting Liquid Droplets with Internal Circulation," *JSME International Journal, Series B*, Vol. 48, No. 2, pp. 293~299.
- (17) Tsai, G. T. and Yang, J. T., 1994, "Numerical Analysis of Convective Ignition and Flame Development over a Porous Sphere," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 96, pp. 1~21.
- (18) Smith, I. W., 1971, *Comb. Flame*, Vol. 17, p. 421.