

미분탄 입자의 크기 차이와 배열이 연소특성에 미치는 영향

김기덕* · 김호영† · 조종표** · 윤석구***

The Effect of Coal Particle Arrangement and Size Difference on Combustion Characteristics

Ki Duck Kim, Ho Young Kim, Chong Pyo Cho and Suk Goo. Yoon

ABSTRACT

The laminar combustion characteristics of interacting coal particles in a convective flow are numerically investigated at particle arrangement and size difference. The numerical simulations, which use the two-step global reaction model to account for the surrounding gas effect, show the detailed interaction among the inter-space particles, undergoing devolatilization and subsequent char burning. Several parametric studies, which include the effect of the gas temperature (1700 K), high pressure(10 atm) and variation in geometrical arrangement of the particle diameter on the volatile release rate and the char combustion rate, have been carried out. The comparison indicates that the shift to the multiple particle arrangement resulted in the substantial change of the combustion characteristics and that the volatile release rate of the interacting coal particles exhibits a strong dependency on the particle spacing and size difference.

Key Words : Devolatilization(탈휘발과정), Horizontal Particle Spacing(수평입자간격), Char reaction (차 반응), Linear arrangement(선형배열)

기 호 설 명

m_p : 미분탄 질량
 R_0 : 입자 반지름
 w_n : 탈휘발률
 X : 수평입자간격

아래침자
 d : 입자지름
 f : 화염
 p : 미분탄입자
 v : 휘발분

1. 서 론

비교적 저렴한 가격과 앞으로 30년 이상 사용 가능한 매장량을 가지고 있는 석탄은 액체 및 가

스 에너지의 대체 에너지로서, 우리나라와 같이 에너지의 해외 의존도가 높은 나라에서는 석탄을 이용하기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 이러한 석탄은 연소 효율과 화염의 안정화를 위해 잘게 쪼개어진 분말 형태의 미분탄을 사용하게 된다. 실제 미분탄 연소기에서는 $100\mu\text{m}$ 이하의 미분탄 입자들이 연소되며 연소기의 고부하 상태에서 분사되어진다. 예열된 상태의 고온의 공기를 블로잉 파이프를 통해 연소기 내부로 분사 되어

* 고려대학교 대학원 기계공학과

† 연락처자, 고려대학교 기계공학과

E-mail : kimhy@korea.ac.kr

** 한국에너지기술연구원 수송에너지연구센터

*** 고려대학교 기계공학과

진 입자들은 미분탄 입자의 상호 작용으로 인하여 단일 입자의 거동과는 다르다. 이러한 조밀하고 자유롭게 분포된 미분탄 입자를 규명하기 위해서는 2차원 배열과 같이 단순화가 필요하다[1~5]. 최근 연구에 따르면 상승된 압력 조건에서 미분탄을 연소시키면 탈휘발이 빨라지고 반응율이 증가되고 연소효율 증가뿐만 아니라 연소로 크기 감소와 경비를 절약할 수 있으며,[6] 다양한 가압 조건에 따른 미분탄 연소특성과[7] 미분탄의 배열에 대해서 레이놀즈 수, 입자간 거리 그리고 수직거리 변화가 미분탄 연소에 미치는 영향[8]에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구의 목적은 대류 환경에서 선형적으로 배열된 크기가 다른 세 개의 미분탄 입자들의 수평거리 변화에 따른 탈휘발 및 차 연소에 미치는 영향을 비교 분석하는 것이다.

2. 이론해석

2.1 지배방정식

2.1.1 기체상의 지배방정식

입자들이 미소중력 하에서 연소한다는 가정 아래 자연대류의 영향은 고려하지 않았다. 기체상의 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho \left(u_j - \frac{\partial x_j}{\partial t} \right) u_i \right\} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

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

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

상태방정식은 Peng-Robinson[13] 방정식을 사용하였다. 본 연구에서는 선형적으로 배열된 미분탄 입자의 주위 환경 변화가 탈휘발 및 Char 연소에 미치는 영향에 초점을 맞추기 위해 입자 내부의 온도는 균일하다고 가정하였다. 그리고 휘발 성분은 메탄을 사용하였다. 메탄과 산소, 일산화탄소와 산소의 Stoichiometric 반응은 다음과 같다.



2.1.2 고체상의 지배방정식

고체상의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} = - \int \sum \dot{m}_n dA - \dot{m}_c \quad (7)$$

$$m_p C_{p,c} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \int \Delta h_c \dot{m}_c dA + h_v \dot{m}_v + \int k \frac{\partial T}{\partial n} dA \quad (8)$$

여기서 미분탄의 온도는 균일하다고 가정을 하였고 \dot{m}_c 와 \dot{m}_v 는 각각 단위면적 당 차산화율 및 탈휘발율을 나타낸다. 석탄의 종류에 따라 휘발분의 조성성분도 다양하나 본 연구에서는 미국 Illinois #6을 대상으로 사용하였으며 그 상태량은 Table 1에 나타내었다.[15]

2.1.3 탈휘발율

탈휘발율은 Two-competing-reaction 모델을 사용하였다.

$$\dot{m}_v = -m_d (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) \quad (9)$$

$$\dot{m}_d = -m_d (R_1 + R_2) \quad (10)$$

$$R_i = A_i \exp(-E_i/RT_p) \quad i=1,2 \quad (11)$$

여기서, α_1 은 휘발분율에 해당하는 0.35을 적용하였고 α_2 는 빠른 반응을 위한 계수로써 0.8을 적용하였다. 탈휘발 및 탄소 표면반응에 대한 반응 상수들은 Table 2에 나타내었다.

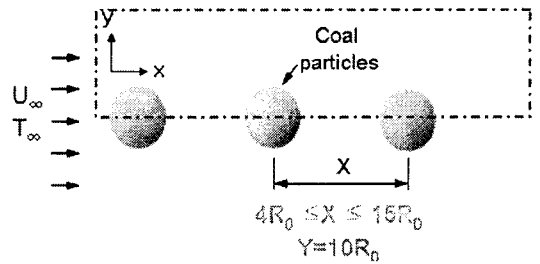


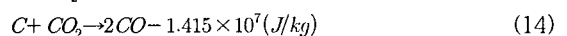
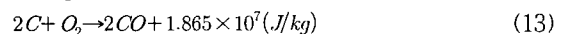
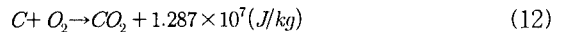
Fig. 1 Schematic of coal particle burning in a convective flow

Table. 1 Proximate analysis of coal (wt. %)

Volatile	Fixed carbon	Moisture	Ash
35.4	51.7	8.4	4.5

2.1.4 Char 반응을

본 연구에서 이용된 미분탄 입자의 표면에서 비균일 반응의 3 가지 종류는 다음과 같다.



위의 반응식에서 표면 반응에 대한 Char 반응율은 다음과 같다[18, 19].

Table. 2 Kinetics constants [16, 17]

Reaction	R = A exp(-E/RT)		
	A	Unit	E(J/kmol)
Devolatilization rate 1	3.7×10 ⁵	s ⁻¹	7.366×10 ⁷
Devolatilization rate 2	1.46×10 ¹³	s ⁻¹	2.511×10 ⁸
Char reaction 1	1.225×10 ³	ms ⁻¹	9.977×10 ⁷
Char reaction 2	3.007×10 ⁵	ms ⁻¹	2.477×10 ⁸
Char reaction 3	4.016×10 ⁸	ms ⁻¹	1.255×10 ⁸

$$\dot{m}_{c1} = -(1/\beta_{c1})\rho_s Y_{O_2,s} A_{c1} \exp(-E_{c1}/RT_p) \quad (15)$$

$$\dot{m}_{c2} = -(1/\beta_{c2})\rho_s Y_{O_2,s} A_{c2} \exp(-E_{c2}/RT_p) \quad (16)$$

$$\dot{m}_{c3} = -(1/\beta_{c3})\rho_s Y_{C_{O_2,s}} A_{c3} \exp(-E_{c3}/RT_p) \quad (17)$$

미분탄 입자 표면에서 전체 화학종의 반응율은 다음과 같다.

$$\dot{m}_c = \int (\dot{m}_{c1} + \dot{m}_{c2} + \dot{m}_{c3}) dA \quad (18)$$

$$\dot{m}_{O_2} = \beta_{c1} \dot{m}_{c1} + \beta_{c2} \dot{m}_{c2} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = -(1 + \beta_{c3}) \dot{m}_{c1} + \beta_{c3} \dot{m}_{c3} \quad (20)$$

$$\dot{m}_{CO} = -(1 + \beta_{c2}) \dot{m}_{c2} - (1 + \beta_{c3}) \dot{m}_{c3} \quad (21)$$

여기서 β_{c1} , β_{c2} 그리고 β_{c3} 는 미분탄입자 표면에서의 Char 반응을 위한 Stoichiometric ratio 이다.

2.2 초기조건

본 연구에서는 산소농도 21%, 압력이 10기압, 온도가 1700 K 인 공기 중에 분사되어 공기와 일정한 상대속도로 탈휘발 및 Char 연소하는 고정된 미분탄 입자들을 대상으로 하였다. 탈휘발 반응은 600 K 이하에서 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 미분탄 입자의 초기온도는 600 K, 직경은 100 μm 로 하였다.[2] 또한 동일한 3개 크기의 나란히 배열된 미분탄의 거리변화와 Re에 따른 영향, 크기가 다른 3개의 미분탄의 거리와 크기 변화에 대한 조건을 주어 수행하였다.

2.3 수치해석

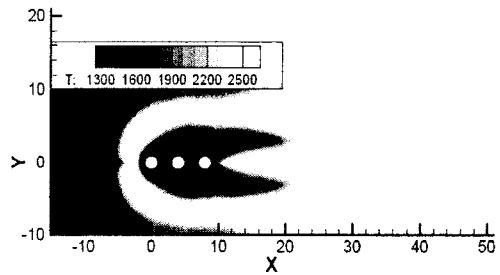
기체상의 지배방정식은 유한체적법을, 유동장 계산은 비엇갈림 격자계, 내재적 방법, 그리고 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였다. 대류 및 확산 유속은 멱승도식(power law scheme)을 이용하였다. 전달 방정식은 일반좌표계로 변환하여 계산하였다.

3. 결과 및 토의

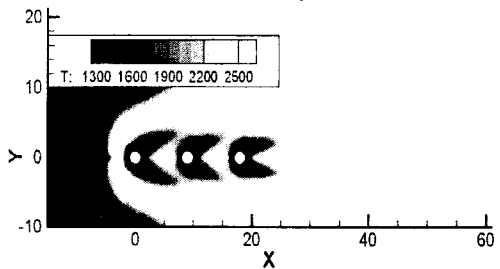
본 연구에서는 동일한 크기의 나란한 3개의 미분탄 입자들의 수평거리에 따른 영향과 미분탄의 각각의 크기 차이가 연소에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

3.1 나란히 배열된 미분탄입자의 연소특성

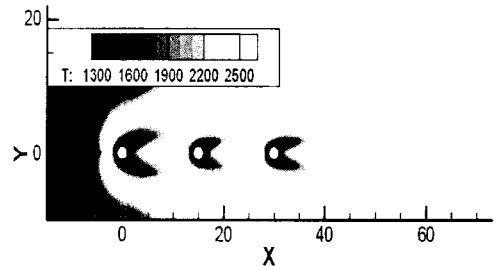
본 연구에서 선형적으로 배열된 연소하는 미분탄 입자들 사이의 간격을 $4R_0 \leq X \leq 15R_0$ 의 범위에서 계산하였다. 먼저 동일한 크기의 입자들이 연소하는 경우를 조사하였다. Fig. 2는 레이놀즈 수가 10일 때 입자간의 수평거리가 4인 경우 화염형태를 나타내고 있다.



(a) X=4R₀



(b) X=9R₀



(c) X=15R₀

Fig. 2 Temperature contours with streamwise Particle spacing at t=2 ms, Re=10, 21% O₂ Air

탈 휘발과정동안 고온의 가스에 노출 되어 있는 미분탄들은 각각 단일 화염을 이루며 주변 미분탄들의 화염에 영향을 받아 Group envelope 화염을 이루게 되며, Fig. 2(a)에서 첫 번째와 세 번째 입자의 휘발분 방출량이 가운데 입자의 휘발분 방출을 지연시키며 온도 상승을 저해하고 있다. Fig. 2(b)에서 보면 입자간의 거리가 9 일 경우 입자간의 Group envelope에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 거리가 15일 경우 Fig. 2(c) 입자간 화염의 영향은 단일 화염에 의한 영향을 받지 못하며 Group envelope 화염이 형성되지 않는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 단일 미분탄의 연소 시 온도변화와 세 개의 나란히 배열된 크기가 같은 (100 μ m) 미분탄의 온도 변화를 나타낸 것이다. 단일입자에서는 미분탄의 반응이 더 빠르게 나타난다. 그러나 나란한 세 개의 미분탄들은 연소 시 서로 간에 상호작용으로 인하여 단일 입자와는 다르게 전체적인 온도 상승 지연이 나타난다. 여기서 입자의 온도는 대부분 화염영역으로부터 열전달에 의해 크게 상승하며 점근적인 온도에 가까워지면서 미분탄 입자에서 방출되는 휘발분의 양은 점차 줄어든다. 차 반응 이후의 온도변화를 보면 차 반응이 일어나면서 세 번째 미분탄의 온도가 가장 높게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 첫 번째와 두 번째의 화염의 영향으로 인해 세 번째 입자의 열전달이 빠르게 일어나 char 반응 시에 가장 온도가 높게 나타나며 이후 온도의 급격한 변화를 볼 수 있는데 이것은 차 반응에 의한 CO 성분이 입자 주위로 전달되면서 산소성분의 확산을 방해하기 때문이다. 또한 동일한 입자들 사이에서의 첫 번째 입자의 경우 수평거리 변화에 대해 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 4(a)는 탈휘발 과정동안 휘발분 방출량에 대한 것이다. 여기서 가운데 입자의 휘발분 방출 지연을 볼 수 있는데 이것은 탈휘발 과정 초기에 가운데 입자의 주위에 미연 휘발분이 농후해지며 주위 온도가 더 낮고 입자의 온도상승이 지연되기 때문이다.

Fig. 4(b)에서 탈휘발 과정 이후 차 반응 동안 세 번째 입자의 거동이 입자간 거리의 변화에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다. 이것은 거리가 가까울(X=4R₀) 경우 두 번째 입자의 차 반응 지연으로 인해 세 번째 입자의 산소성분의 확산 방해를 이어지게 된다. 이로 인해 세 번째 입자의 차 반응의 시간 지연이 생기며 두 번째 입자와 같은 차 반응 거동을 하게 된다. 그러나 거리가 멀어질 경우(X=15R₀) 두 번째 입자의 영향에서 멀어지게 되어 첫 번째 입자와 같은 거동을 하게 된다.

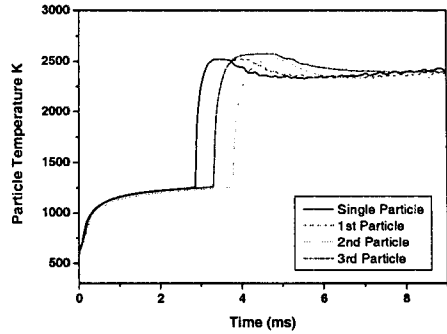
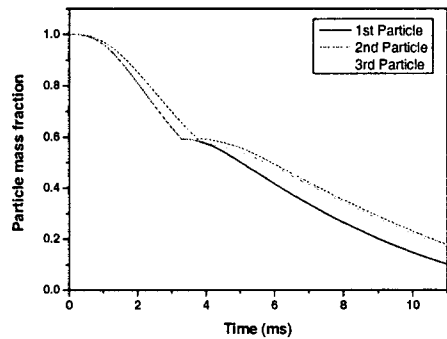
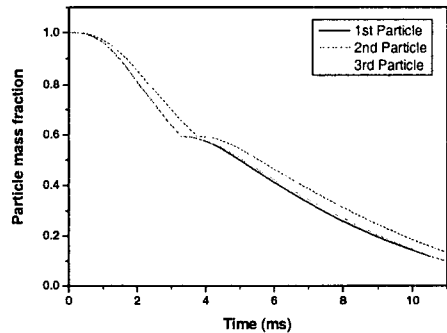


Fig. 3 Three particles temperature at Re=10, 21% O₂ Air(X=4).



(a) X=4R₀



(b) X=15R₀

Fig. 4 Particle mass fraction at Re=10, 21% O₂ Air

3.2 미분탄 입자의 크기차이에 따른 영향

본 연구에서는 크기가 다른 미분탄 입자들 사이에서 미분탄 입자의 크기를 85~100 μ m의 범위의 값으로 고려하여 입자의 크기에 따른 영향을 살펴보기 위해서 미분탄 사이의 거리는 일정하게

놓고 가운데 입자가 큰 경우와 가운데 입자가 작은 경우의 입자들의 연소 특성을 알아보았다.

Fig. 5은 첫 번째 입자의 탈휘발 과정과 Char 연소로 이어지는 3~4ms 사이에서 두 번째 입자가 주변의 입자보다 큰 경우 첫 번째 입자 앞에 Group envelope 화염이 형성되어 산소성분이 화염 영역에서 대부분 소모되어 두 번째 입자로의 화염 침투깊이가 감소하게 되며 두 번째 입자의 주위 온도는 낮아지게 되고 두 번째 입자로 전달되는 열은 더욱 감소한다. 세 번째 입자의 경우, 두 번째 입자의 온도 지연으로 인해 Char 연소 이후 반응에서 온도가 지연 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 첫 번째 입자의 크기가 두 번째 입자보다 작은 경우 첫 번째 입자의 산소 확산 방해로 인해 두 번째 입자의 휘발분 방출 및 질량손실률에 영향을 받는다. 이후 4ms에서 두 번째 입자의 휘발성분이 세 번째 입자와 Group envelop 화염을 이루는 것을 볼 수 있다.

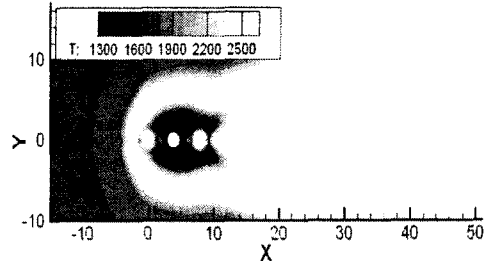
Fig. 6에서는 두 번째 입자가 주변의 입자보다 작은 경우인데 첫 번째 입자가 두 번째 입자보다 큰 경우 입자들의 Group envelope 화염의 형성에서 첫 번째 입자의 화염이 두 번째 입자에 영향을 미치지 않고 세 번째 입자에 영향을 주게 된다. 두 번째 입자는 작은 크기으로 인해 첫 번째 입자의 휘발분의 영향을 받지 않고 빠른 탈휘발 과정을 가지게 된다.

Fig. 7은 탈휘발 과정 동안 두 번째 입자의 온도 지연을 볼 수 있다. 여기서 주변의 입자보다 상대적으로 큰 두 번째 입자는 첫 번째 입자의 휘발분의 영향을 받아 온도 지연이 생긴다. Char 반응 **Fig. 9** 또한 지연을 가지고 오게 되며 상대적으로 온도가 낮아지게 된다.

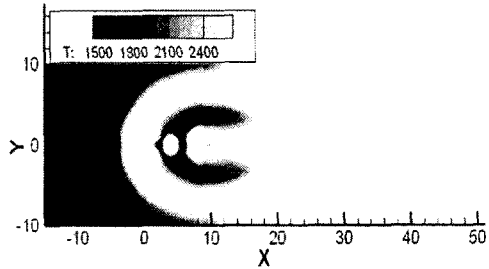
Fig. 8에서는 두 번째 입자가 주변의 입자보다 작은 경우 탈휘발 과정 시 휘발분율을 나타내고 있다. 여기서 두 번째 입자의 휘발분 방출이 빠른 것을 알 수 있는데 이것은 첫 번째 입자가 유동장에 노출되어 반응을 하며 상대적으로 작은 두 번째 입자에 영향을 미치지 못하고 세 번째 입자에 영향을 미치게 되어 상대적으로 큰 첫 번째와 세 번째 입자들의 휘발분 방출이 지연된다. 그러나 차 반응 **Fig. 10**에서 첫 번째 입자와 두 번째 입자의 화염으로 인한 세 번째 입자의 화염이 열전달에 의해 온도가 상승하게 되며 앞의 두 입자들의 차 반응에 의한 CO 성분이 주위로 전달되며 산소 성분의 확산을 방해하여 질량손실률이 줄어들게 된다.

4. 결론

나란히 배열된 3개의 미분탄의 입자의 주변 크

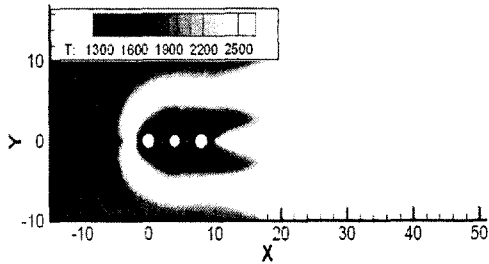


(a) 3ms

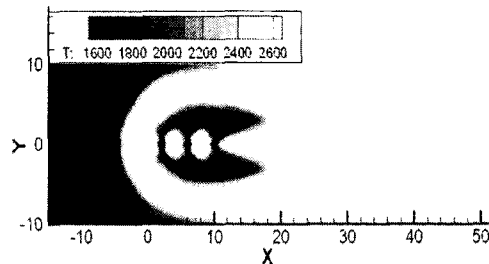


(b) 4ms

Fig. 5 Temperature contours with Horizontal Particle spacing at larger than both side(85-100-85 μ m), Re=10, 21% O_2 Air ($X=4R_0$).



(a) 3ms



(b) 4ms

Fig. 6 Temperature contours with Horizontal Particle spacing at smaller than both side(100-85-100 μ m), Re=10, 21% O_2 Air ($X=4R_0$).

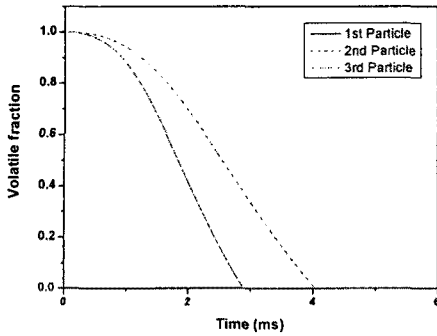


Fig. 7 Volatile fraction of Coal Particles at larger than both side(85-100-85 μ m), Re=10, 21% O₂ Air (X=4R₀).

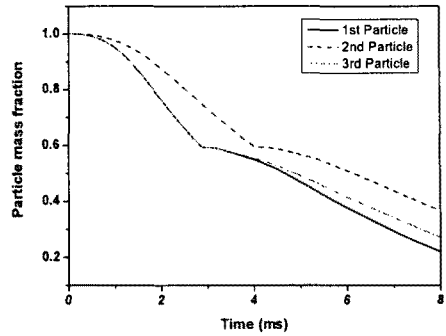


Fig. 9 Particle mass fraction at larger than both side(85-100-85 μ m), Re=10, 21% O₂ Air (X=4R₀).

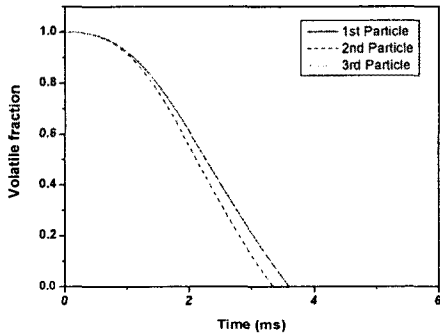


Fig. 8 Volatile fraction of Coal Particles at smaller than both side(100-85-100 μ m), Re=10, 21% O₂ Air (X=4R₀).

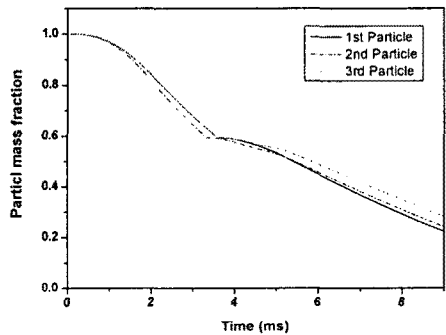


Fig. 10 Particle mass fraction at smaller than both side(100-85-100 μ m), Re=10, 21% O₂ Air (X=4R₀).

기 차이와 입자간의 거리 변화에 의한 탈휘발 과정 및 Char 연소에 미치는 영향을 알아보았다.

여기서 미분탄 입자의 거리가 가까울수록 입자간의 탈휘발 성분과 Group envelope 화염의 형성으로 두 번째와 세 번째 입자의 휘발분과 온도지연의 영향이 커지며 입자간 거리가 멀어질수록 영향이 감소한다.

미분탄의 주위의 입자보다 가운데 입자가 큰 경우 첫 번째 입자의 화염에 의한 휘발성분 방출 감소와 산소 확산 방해로 두 번째 입자와 세 번째 입자의 온도지연을 가져온다.

미분탄의 주위의 입자보다 가운데 입자의 크기가 작은 경우 첫 번째 입자의 화염과 휘발성분에 영향이 두 번째 입자의 반응의 영향을 미치지 않으나 차 반응 이후에 CO 성분이 주위로 전달되며 산소 성분의 확산을 방해하여 질량손실률이 줄어들게 된다.

후기

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

참고문헌

- [1] L. D. Timothy, D. Froelich, A. F. Sarofim and J. M. Beer, "Characteristics of single particle coal combustion", Proceeding of the Combustion Institute 19, pp. 1123-1130, 1982.
- [2] I. W. Smith. "The kinetics of combustion of pulverized semi-anthracite in the temperature range 1400-2200K", Combustion and Flame 17, pp. 421~428, 1971.
- [3] H. Kobayashi, J. B. Howard and A. F. Sarofim, "Coal devolatilization at High Temperatures", Proceedings of the Combustion

institute 16, pp. 411~425, 1976.

[4] J.M. Beer, "Combustion technology developemet in power generation in response to environmental challenges", *Progress in Energy and Combustion Science* 26, pp. 301~327, 2000.

[5] He, R., Suda., T., Fujimori, T. and Sato, J., "Effect of Particle Size on Transport Phenomena in Single Char Combustion," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3619~3627, 2003.

[6] Liakos, H. H., Theologos, K. N., Boudouvis, A.G. and Markatos, N. C., "The Effect of Pressure on Coal Char Combustion", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp.917~928, 2001.

[7] Niksa, S., Liu, G. and Hurt R. H., "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, 2003.

[8] 조종표, 김호영, 정진택, "미분탄 입자들의 배열이 미분탄 연소에 미치는 영향", *대한기계학회 논문집 B권*, 제29권, 12호, pp.1321~1328, 2005.

[9] Zhou, L. X., "Combustion Theory and Chemical Fluid Dynamics", Science Press, Moscow, 1986.

[10] Li, Z. Q., Wei, F. and Jin, Y., "Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion and No Formation", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, pp. 5161~5171, 2003.

[11] Kim, H. Y., Cho, C. P. and Chung, J. T., "Correlation of Burning Rate of the Interacting Liquid Droplets with Interanl Circulation," *JSME International Journal, Series B*, Vol. 48, No. 2, pp. 293~299, 2005.

[12] Freihaut, J. D., "A Numerical and Experimental Investigation of Rapid Coal Pyrolysis", Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University, 1980.

[13] Poling, B. E., Prausnitz, J. M. and O'Connell, J. P., "The Properties of Gases and Liquids", McGraw Hill, New York, 2001.

[14] Westbrook, C. K. and Dryer, F. L., "Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames", *Combust. Sci. and Tech*, Vol. 27, pp.31~43, 1981.

[15] Beck, N. C. and Hayhurst, A. N., "The Early Stage of the Combustion of Pulverized Coal at High Temperatures I : The Kinetics of Devolatilization", *Combust. Flame*, Vol. 90, pp. 47~74, 1990.

[16] D. Merick, "Mathematical models of the thermal decomposition of coal: 2. Specific heat and heats of reaction", *Fuel* 62, pp. 540~546, 1983.

[17] H. Kobayashi, J. B. Howard, and A. F. Sarofim, "Coal Devolatilization at High Temperatures", *Proceedings of the Combustion Institute* 16, pp. 411~425, 1976.

[18] Y. C. Guo, C. K. Chan, and K. S. Lau, "Numerical Studies of Pulverized Coal Combustion in a Tubular Coal Combustor with Slanted Oxygen Jet", *Fuel* 82, pp. 893~907, 2003.

[19] E. Mon and N. R. Amundson, "Diffusion and Reaction in a Stagnant Boundary Layer about a Carbon Particle. 2. An Extension," *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 17, pp. 313~321, 1978.