

## 미분탄 연소의 점화 특성에 관한 연구

이동방\*, 김량균\*, 송주현\*\*, 진충환\*\*†

### Ignition behaviour of pulverized coal particle during coal combustion

Dongfang Li\*, Ryang Gyoon Kim\*, Ju Hun Song\*\* and Chung-Hwan Jeon\*\*†

#### ABSTRACT

As one of the primary fuel sources, oxy-fuel combustion of coal is actively being investigated because of the climate changing problem such like the emission of green house gases. In this paper research about the pulverized coal technology, which is widely used in both power-generating and iron-making processes was studied to investigate the ignition behaviour of pulverized coal particles during coal combustion as changing the ambient oxygen concentration of the particle. The ignition phenomenon of the coal particles fed into a laminar flow reactor was imaged with a Integrated charged-coupled device (ICCD) camera. The ignition points were determined through the analysis of the images, and then the ignition delay times were able to be calculated. The experiment results show that a lower oxygen concentration increases the ignition delay time.

**Key Words** : Combustion, Ignition, Pulverized Coal, Laminar Flow Reactor

석탄은 매장량, 경제성 등 장점으로 발전, 제철 등 광범위한 공업 프로세스의 에너지원으로 사용되고 있다. 현재 온실가스 배출 등 기후 변화 문제에 대비하여 석탄 연소 효율을 높일 뿐만 아니라 배기 배출물인 CO<sub>2</sub> 가스를 후처리 공정 생산에 사용되는 등 여러 기술이 개발되고 있다. 그러나 후처리 공정 등 신기술 개발로 인한 경제성 및 안정성의 리스크 상승 보다, 일차적으로 미분탄 연소 기술의 효율을 높이는 것이 중요하다. 따라서 많은 선행연구자들은 미분탄 연소 기술의 효율을 높이기 위한 연구를 진행해 왔다<sup>[1],[2]</sup>.

역청탄인 A의 점화특성을 연구하기 위해 층류반응기 및 ICCD 카메라를 활용하였다. 본 연구에서 사용된 시스템에 대한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 층류 반응기의 버너는 Honeycomb 구조로 이루어져 있으며, CH<sub>4</sub>-공기를 이용하여 1500K의 층류 평판 확산 화염을 형성하였다. 화염 상단 온도의 급격한 변화를 방지하기 위하여 또한 석탄 입자 연소 구역에 외부 가스의 진입을 방지하기 위하여 원형 투명 석영관을 설치하였다. 버너 중앙에는 스테인리스 튜브를 삽입하여, 본 튜브로 N<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub> pre-mixed 가스를 carrier gas로 공급하여 석탄 입자를 버너 상

단 고온 분위기로 이송하였다. 버너 상단 중심선 높이에 따라 온도의 분포는 fig. 2에서 나타내었다. 정량적으로 feeding rate(1g/hr)을 유지하기 위하여 Syringe pump방식의 feeding 시스템을 제작하였다. 석탄점화 지점을 측정하기 위해 ICCD 카메라를 평판 확산 화염으로부터 석탄화 반응 지점까지 초점을 조정하였다. 석탄 입자 반응영역 온도 분포는 석탄 입자가 공급되는 중앙 튜브를 따라 수직 방향으로 125- $\mu$ m, R-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 측정된 온도는 열전대의 비드로부터 복사 열손실을 고려하여 보정하였으며, 본 결과는 Fig. 2에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 석탄은 역청탄으로, 본 석탄의 물성치는 Table 1에 정리되어 있다. 본 실험에서 feeding rate은 1g/hr 이고 석탄 점화를 위한 산화제 조건은 Table 2에서 나타내고 있다. 평판 층류 화염 CH<sub>4</sub>-공기의 당량비는 1이다. 연소가스의 속도와 산화제의 이송속도는 0.7 m/s로 동일한 조건에서 실험을 하였다.

**Table 1.** Proximate and ultimate analysis of coal used in this experiment

Proximate Analysis (%)			
<i>IM</i>	<i>Ash</i>	<i>VM</i>	<i>FC</i>
1.2	7.9	12.4	78.6

\* 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

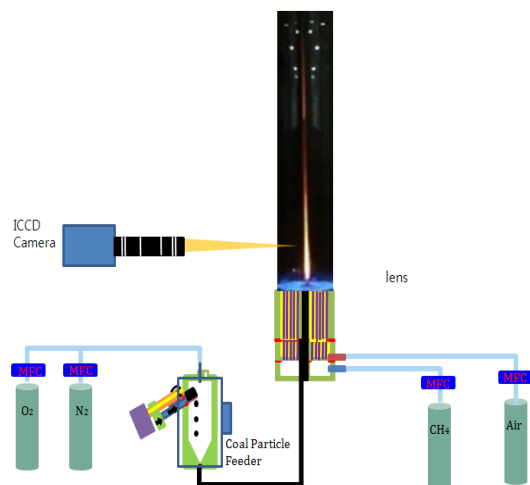
† 연락처, chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3051, FAX : (051)-582-9818

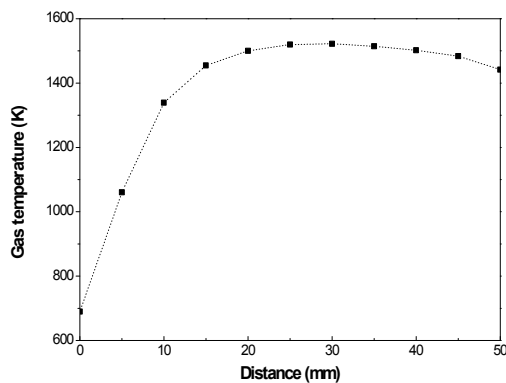
Ultimate Analysis(% , dry ash free basis)				
C	H	N	S	O
92.3	4.5	1.8	0.5	0.9

**Table 2** Carrier gas condition

Gas Mass Flow Rate	N2 Mass Fraction		
	5%	9%	15%
N2 (g/sec)	0.012	0.0216	0.036
O2 (g/sec)	0.228	0.2184	0.204
Total (g/sec)	0.24	0.24	0.24



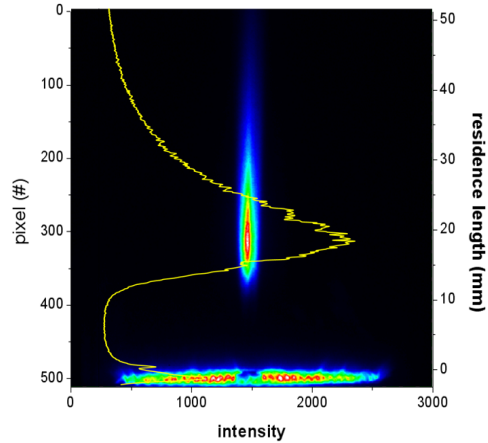
**Fig. 1** Schematic of LFR and pulverized coal feeding system



**Fig. 2** Temperature distribution in the vertical direction above the burner

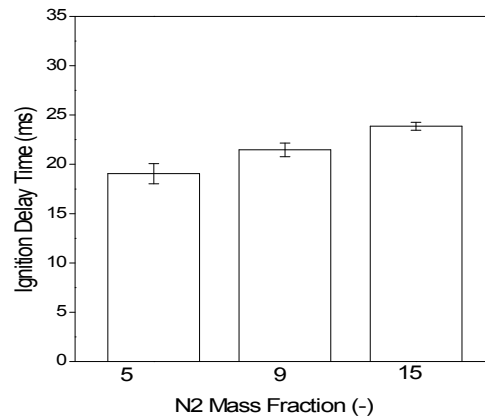
Fig. 3은 ICCD 카메라를 이용하여 얻은 이미지

에 대한 intensity 분석을 나타내고 있다. Fig. 3 하단은 버너에서 형성된 화염을 나타내며 상단 화염은 석탄 입자 연소에 의하여 형성된 화염을 나타낸다.  $CH^*$  Chemiluminescence emission의 intensity를 Normalization 하였으며, 각 pixel에 대한 intensity를 도출한 후 intensity의 기울기가 30%되는 지점을 ignition 위치를 결정하였다.



**Fig. 3** An example of pixel imaging analysis

미분탄 입자의 ignition 위치가 결정된 다음 속도를 이용하여 미분탄 입자의 ignition delay time을 계산하였다. Fig. 4는 질소 질량 분율의 변화에 따른 점화 지연시간을 나타내고 있다.



**Fig. 4** Ignition delay time increases with N2 mass fraction increasing

석탄 입자의 점화 메커니즘은 석탄의 탈휘발분이 산화제와 반응하는 homogeneous ignition과 석탄화와 산화제가 반응하는 heterogeneous ignition으로 크게 두 부분으로 구분된다<sup>[1]</sup>. 본 실험에서는 석탄을 직접적으로 feeding하여 연소하였으므로, 휘발분과 산화제의 반응을 통한

homogeneous ignition으로 볼 수 있다. 석탄 탈휘발화 과정은 흡열과정이기 때문에 식 (1)<sup>[3]</sup>에서 나타낸 것과 같이 석탄 입자 주위 온도(T) 및 heating rate( $dT/dt$ )의 영향을 크게 받는다.

$$\frac{dm_v}{dt} = k_o \exp(-E/RT)(m_\infty - m_v)^N \quad (1)$$

본 실험에는 주위 온도 및 heating rate의 조건이 일정하기 때문에, 탈휘발화율이 같다고 가정할 수 있다. 따라서, 탈휘발화 과정에 의한 석탄 입자 점화지연시간의 변화는 무시할 수 있고 휘발분과 산화제의 homogeneous ignition에 의한 결정된다.

식 (2)<sup>[4]</sup>과 같이 Homogeneous gas-phase ignition은 주위 가스의 열전달 특성( $c_v$ ), 연료 단위 질량당 연소열( $q_c$ ) 및 연료-산화제의 reactivity( $k$ )에 의하여 결정된다.

$$t_{\text{ignition}} = \frac{c_v(T_0/T_a)}{q_c Y_{F,o} k} \quad (2)$$

본 실험에서는 주위 가스가 동일하기 때문에 주위 가스의 열전달 특성은 같다고 볼 수 있어 무시할 수 있다. 연료 단위 질량당 연소열은 휘발분 성분이 항상 일정하기 때문에 역시 점화지연시간의 변화에 대한 영향을 무시할 수 있다. 최종적으로 결정되는 요소가 식 (3)에서 나타낸 연료 산화제의 reactivity가 된다.

$$k = A \exp(-E/RT)[Fuel]^a [O_2]^b \quad (3)$$

식(3)에서와 같이  $[O_2]^b$ 가 결정적인 parameter가 되며, 석탄 입자 탈휘발화 과정 중 주요 휘발분이  $CH_4$ 로 가정할 때 b가 1.3이 된다. 식(3)을 식(2)로 대입하면 식(4)<sup>[1]</sup>와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$t_{\text{ignition}} \propto [O_2]^{-1.3} \quad (4)$$

식(4)에서 계산된 결과 및 실험에서 나오는 결과를 normalizing하였으며, 본 계산 결과와 실험 결과를 Fig. 5에서 나타내었다. 실험 결과 및 이론 결과는 같은 경향을 보여주고 있다.

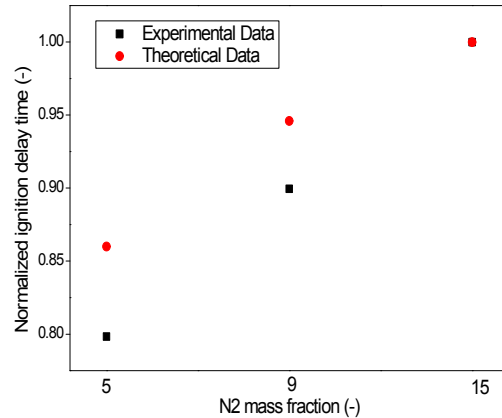


Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental normalized ignition delay time

본 연구에서는 층류반응기 및 ICCD를 이용하여 산화제 함량에 따른 역청탄 미분입자의 점화특성을 규명하였다.

(1) 석탄 주변의 산소의 함량(95, 91, 85%)이 감소할수록 휘발분과 반응할 수 있는 산소 %가 감소하기 때문에 점화시간이 지연되며, 점화 거리가 길어지는 것을 확인하였다.

(2) 산소 함량에 따라 실험으로부터 얻어진 휘발분 점화시간과 이론적 점화 지연시간을 정규화하여 비교한 결과 동일하게 상승하는 결과를 확인하였다.

## 후 기

논문은 3단계 BK21 사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 전력산업원천기술개발사업의 지원으로 연구를 수행하였으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

- [1] Shaddix C.R. Molina A. Particle imaging of ignition and devolatilization of pulverized coal during oxy-fuel combustion, Proc. Combust. Inst. 2009.
- [2] Shaddix C.R. Molina A. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion, Proc. Combust. Inst. 2009.
- [3] C. K. Law. Combustion Physics, 2006, 309.
- [4] Turns S. R. An Introduction to Combustion, 2000, 157.