

미분탄 순산소 연소에서 주위 기체와 석탄 특성이 화염전파에 미치는 영향

강영민* · 심영삼** · 문철언* · 성연모* · 서상일**** · 김태형**** · 최경민† · 김덕줄***
(2008년 8월 21일 접수, 2008년 11월 11일 수정, 2008년 12월 23일 심사완료)

Influence of Surrounding Gas and Coal Characteristics on Flame Propagation in Oxy-Fuel Combustion of Pulverized Coal

Young-Min Kang, Young-Sam Shim, Cheor-Eon Moon, Yon-Mo Sung, Tae-Hyung Kim, Sang-Il Seo, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim

Key Words : Activation Energy(활성화에너지), Flame Propagation(화염전파), Monte Carlo Method(몬테카를로법), Volatile(휘발분)

Abstract

Oxy-fuel combustion of pulverized coal is one of the promising new technologies to reduce CO₂ and NO_x from coal combustion. However, the stability of pulverized coal flame is reduced in the oxy-fuel combustion. This flame stability is concerned with the flame propagation that is affected by surrounding gas and coal characteristics, such as gas temperature, gas composition, coal volatile, coal activation energy and coal size. In this paper, a study on the influence of surrounding gas and coal characteristics on the flame propagation velocity in oxy-fuel combustion of pulverized coal was preformed. One dimensional model was used to calculate the flame propagation velocity of pulverized coal clouds. In this model, the radiation is considered to be the main source of heat exchange, and Monte Carlo method was adopted for accurate calculation of radiation heat flux. It was found that the flame propagation velocity become higher with the decrease of coal activation energy and the increase of coal volatile. Also, according to the increase of gas temperature and O₂ concentration, flame propagation velocity increased.

기호설명

C_p : 정압 비열
D_p : 미분탄 입경
K : 가스 열전도율
N_c : 각 요소 내 석탄입자의 수
N_p : 요소에서의 미분탄 수밀도

Q_f : 입자와 가스의 전도 열 유속
Q_{react} : 휘발분 연소에 의한 열 방출
Q_{rg} : 가스의 흡수 복사 열 유속
Q_{rp} : 미분탄 입자의 흡수 복사 열 유속
T_g : 가스 온도
T_{ig} : 미분탄 착화 온도
T_p : 입자의 온도
V_g : 각 요소에서의 가스체적
ρ : 밀도

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 화력발전 에너지기술 분석센터

E-mail : choigm@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2476 FAX : (051)512-5236

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 부산대학교 기계공학부

*** 부산대학교 기계공학부 기계기술연구원

**** 한전 전력연구원

아래첨자

g : 가스
p : 미분탄 입자

1. 서론

현재 전력생산량의 많은 부분을 차지하고 있는 석탄은 앞으로도 그 사용량이 증가할 것으로 보인다. 그러나 석탄은 CO₂나 NO_x와 같은 많은 배출물을 발생시켜 환경오염의 주 요인으로 지적되고 있다.⁽¹⁾ 따라서, 이러한 배출물을 줄이기 위한 새로운 석탄 연소 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, CO₂나 NO_x를 감소시킬 수 있는 미분탄 순산소 연소는 새로운 석탄 연소 기술로서 많은 관심을 받고 있다.⁽²⁾ 미분탄 순산소 연소는 산화제로 공기를 사용하던 기존의 연소 방법과는 달리 산화제로 O₂/CO₂를 사용함으로써 NO_x의 발생을 감소시킬 수 있으며, 고농도의 CO₂는 쉽게 분리가 가능해 CO₂와 NO_x 동시에 저감시킬 수 있는 기술이다. 그러나 이러한 미분탄 순산소 연소 조건에서는 화염 안정성이 감소하는 문제점이 있다. 따라서, 미분탄 순산소 연소의 화염안정성 및 이와 관련된 화염전파 속도에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

Cho 등⁽³⁾은 대류환경에서 선형적으로 배열된 미분탄 입자들의 연소 거동을 규명하고, 입자간의 수평거리, 수직거리, 레이놀즈 수가 탈 휘발 및 탄소 변화율에 미치는 영향을 단일 입자의 결과와 비교 분석 하였다. 또한, 미분탄 입자간의 거리가 입자의 연소 거동에 큰 영향을 미친다는 것을 관찰하였다. Ponzio 등⁽⁴⁾은 미분탄 입자의 점화 시기는 산소 농도와 산화제 온도가 증가함에 따라 감소하며, 고온의 분위기에서는 산소 농도와 산화제의 온도가 점화시기에 크게 영향을 미치지 않는 것을 관찰하였다. Bejarano 등⁽⁵⁾은 산화제에 따른 미분탄 연소에 미치는 영향을 관찰하였다. 미분탄 화염 온도는 O₂/CO₂ 주위 기체와 O₂/N₂의 주위 기체 두 조건에서 모두 산소 농도 증가에 따라 증가하며, O₂/CO₂ 조건에 비해 O₂/N₂ 조건에서 미분탄 입자 온도가 높고, 미분탄 연소 시간이 감소하는 것을 관찰하였다. 그러나 이러한 연구는 미분탄 연소 현상에 대한 기초적인 정보를 제공하지만, 실제 미분탄 연소에는 석탄 입자의 물성치와 주위 가스의 특성 등 다양한 인자들이 영향을 미치므로 보다 세부적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 미분탄 순산소 연소에서 석탄 입자의 물성치와 주위 기체의 특성이 화염전파속도에 미치는 영향에 대해 수치적 방법을 통하여 해석하였다. 활성화 에너지 및 휘발분과 같은 석탄 물성치와 석탄 농도에 따른 영향을 알아보았으며,

주위 기체의 온도 및 CO₂/O₂ 농도비 변화에 따른 화염전파속도를 1 차원 화염전파 모델을 이용하여 계산하였다.

2. 수치해석 방법 및 조건

2.1 수치해석 방법

Fig. 1은 미분탄의 화염 전파 속도 계산을 위한 1 차원 모델의 개념도이다. 실제, 미분탄 입자는 반응로에서 화염과 고온의 벽면으로부터 복사열전달을 받게 되고, 이에 따라 미분탄 입자는 탈 휘발 과정과 함께 연소되기 시작한다. 이 모델은 미분탄 연소에서 주위 가스와 석탄 입자 혼합물의 흡수, 배출, 산란을 고려했다. 길이 Δl인 동일한 크기의 N개의 요소로 구성되어 있으며, 첫 번째 요소에서 점화에 의해 화염이 발생함에 따라 기체 및 미분탄 온도는 상승하게 되고 다음 위치의 요소로 열이 전달된다. 이 때 각 요소간의 열 전달은 복사에 의한 것으로 가정하였고, 전도는 고려하지 않았다. 각 요소 내에서는 인접한 요소로부터 전달된 복사열이 요소 내에 존재하는 미분탄 입자와 주위가스로 흡수된다. 미분탄 입자와 주위 가스 사이에는 전도에 의한 열 교환이 발생하고, 시간 경과에 따라 미분탄 입자의 온도는 점차 상승한다. 온도의 상승과 함께 휘발분이 배출되기 시작하고, 온도가 T_{ig}에 도달하면 화염이 발생하게 된다. 각 요소 내에서 입자의 온도와 가스의 온도는 균일하다고 가정하였다. 요소 내에서 미분탄 입자의 온도 T_p와 주위 가스의 온도 T_g는 아래의 에너지 방정식에 의해 결정된다.⁽⁶⁾ 이 방정

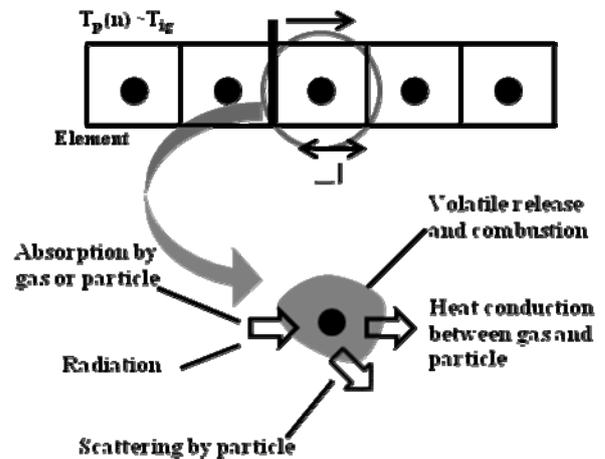


Fig.1 One dimensional model of flame propagation

$$C_{pp} \cdot \frac{\pi \cdot D_p^3 \cdot \rho_p}{6} \cdot N_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = Q_{rp} - Q_f + \alpha \cdot Q_{\text{reac}} \quad (1)$$

$$C_{pg} \cdot V_g \cdot \rho_g \cdot \frac{dT_g}{dt} = Q_{rp} + Q_f + (1 - \alpha) \cdot Q_{\text{reac}} \quad (2)$$

식은 각 요소 간의 복사열전달, 미분탄 입자와 가스 사이의 전도 열 교환과 휘발분 연소에 의해 방출된 열이 관련된 식이다. Q_{rp} 와 Q_{rg} 는 입자와 가스의 복사열 흡수와 산란을 통한 열 유속을 나타내는 것으로서, Monte Carlo method를 이용하여 계산하였다.⁽⁷⁾ 여기서 석탄입자의 산란은 Mie의 산란이론,^(8,9) 가스의 흡수 계수는 Hottel and Sarofim의 gray-gas 모델을 이용하여 계산되었다.^(10,11) Q_f 는 다음 식으로 계산되었다.

$$Q_f = 2 \cdot \frac{k}{d} \cdot (T_p - T_g) \cdot \pi d^2 \cdot N_c \quad (3)$$

여기서, K 는 가스의 열전도율, T_p 와 T_g 는 각각 입자와 가스의 온도, d 는 입자의 직경, N_c 는 요소 내에 석탄입자의 수를 나타낸다. 이것은 미분탄 입자와 주위 가스의 열 교환을 나타낸 것으로 대류의 영향은 무시하였고, 전도에 의한 열 전달만을 계산하였다. Q_{reac} 는 휘발분의 연소 반응열이 무한하다고 가정하고, 일차반응 모델을 이용하여 휘발분의 양과 발열량에 따라 계산하였다. 여기서 휘발분 연소에 의해 배출되는 열은 어떠한 분포율 α 를 가지고 미분탄 입자에 분포된다. 이 값은 입경에 따라 달리 적용되며 50 μm 일 때 0.06, 100 μm 일 경우에 0.02이다.⁽¹²⁾ 입자에 분포된 열을 제외한 나머지는 주위 가스로 전달된다.

2.2 활성화 에너지

활성화 에너지⁽¹³⁻¹⁵⁾는 TGA(Thermo Gravimetric Analysis) 실험 결과를 바탕으로 계산하였다. 이 실험결과 바탕으로 다음의 운동방정식을 세울 수 있다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) \quad (4)$$

여기서, α 는 질량변화율, K 는 속도상수, $f(\alpha)$ 는 mass conversion이다. α 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{m_i - m}{m_i - m_f} \quad (5)$$

여기서, m , m_i , m_f 은 반응물 질량, 반응물의 반응 전과 후의 질량을 나타낸다. $f(\alpha)$ 는 형상에 관한 영향을 고려하여 다음의 식으로 계산하였다.

$$f(\alpha) = 3(1 - \alpha)^{2/3} \quad (6)$$

속도상수 K 는 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\alpha}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = k(T) \cdot f(\alpha) \quad (7)$$

$$k(T) = \frac{\beta}{f(\alpha)} \cdot \frac{d\alpha}{dT} \quad (8)$$

여기서, β , T , t 는 각각 승온 속도(dT/dt), 절대온도, 반응시간을 나타낸다. 이 식들을 정리하여 Arrhenius 식^(14,15)에 대입하면 다음과 같은 식이 나타난다.

$$\frac{d\alpha}{dT} = \left(\frac{A}{\beta}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot f(\alpha) \quad (9)$$

활성화 에너지는 식 (9)로부터 유도된 $\ln\left(\frac{\beta}{f(\alpha)} \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right)$ 와 $\frac{1}{T}$ 에 대한 그래프의 기울기를 통해 얻을 수 있다.

2.3 수치해석 조건

Table 1은 계산에 고려된 6종의 석탄의 물성치를 나타내고 있다. Table 2는 석탄의 원소 분석 결과이다. 주위 가스는 산소와 이산화 탄소의 혼합 기체로 이에 따른 물성치는 두 가스의 질량 분율을 이용하여 아래의 식으로 계산되었다.

Table 1 Coal properties

Coal	Volatile [wt%]	Heating Value [kJ/kg]	Activation Energy [kJ/kmol]
A.B.K	42.19	28543.2	74.66
A.B.K-1	40.44	28295.4	87.33
Jembayan	41.14	28686.0	46.55
Daedong	29.00	31386.6	46.74
Roto(m)	46.65	27400.8	73.29
Bengalla	34.61	28248.8	50.26

Table 2 Composition of coal [wt%]

	A.B.K	A.B.K-1	Jembayan
C	69.00	71.23	70.50
H	4.54	4.53	5.50
S	0.06	0.25	0.16
O	20.65	15.6	17.66
N	1.23	1.38	1.45
Fixed carbon	41.53	41.95	42.01
	Daedong	Roto(m)	Bengalla
C	78.63	69.70	72.50
H	4.31	5.50	5.43
S	0.64	0.04	0.75
O	7.63	20.86	5.39
N	0.81	0.76	1.99
Fixed carbon	59.93	37.99	50.13

$$P_{O_2} \cdot \varphi_{O_2} + P_{CO_2} \cdot \varphi_{CO_2} = P_{mix} \quad (10)$$

여기서, P_{O_2} , P_{CO_2} 와 P_{mix} 는 O_2 와 CO_2 그리고 혼합 가스의 온도에 따른 물성치를 나타낸다. 그리고 φ_{O_2} , φ_{CO_2} 는 각각 O_2 와 CO_2 의 질량분율을 나타낸다. 산소의 농도는 40 %에서 80 %까지, 미분탄의 농도는 $0.1 \text{ kg/m}^3 \sim 4.0 \text{ kg/m}^3$ 까지 고려하였다. 입경의 영향을 알아보기 위해 $50 \mu\text{m}$ 와 $100 \mu\text{m}$ 의 두 가지 입경이 고려되었다. 석탄에서 발생하는 휘발분은 모두 메탄으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주위기체의 영향

주위 기체의 영향을 알아보기 위해 O_2/CO_2 와 공기를 산화제 사용하여 계산하였다. Fig. 2 는 주위 가스의 온도가 300K, 석탄농도 0.5 kg/m^3 인 조건에서, 공기와 산소농도 40%인 O_2/CO_2 를 산화제로 사용한 경우 화염전파속도 ($\Delta P_f / \Delta t$)를 나타내고 있다. Jembayan, Roto(m), A.B.K-1 의 세 가지 종류의 석탄을 사용하였다. 전반적으로 O_2/CO_2 보다 공기를 사용한 경우 화염전파속도가 빠르게 나타났다. 화염전파속도의 최대값은 공기를 사용한 경우 3 종 석탄 모두 약 23% 증가하였다. 이는 O_2/CO_2 연소 조건에서 주위기체에 포함된 CO_2 의 열용량이 크기 때문이다.

O_2/CO_2 주위 기체 조건에서 기체의 온도 및 O_2 농도가 화염전파에 미치는 영향에 대해 계산하였다. Fig. 3 은 산소농도 40%인 조건에서 기체 온도에 따른 화염 위치를 나타내고 있다. Bengalla, Daedong, Jembayan 세 가지의 탄 종을 사용하였다.

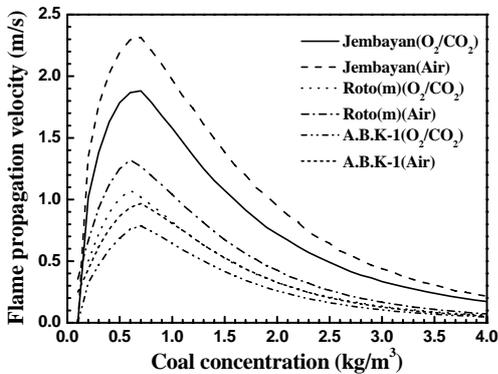


Fig. 2 Flame propagation velocity according to changing coal concentration

미분탄 종류에 관계없이 착화시기와 화염전파속도는 기체 온도가 300K 인 경우 보다 1000K 에서 빠르게 나타났다. 이는 고온의 분위기 조건에서 석탄 입자의 온도가 증가하고, 이에 의해 미분탄의 착화 시간이 짧아지기 때문이다.

Fig. 4 는 기체 온도 300K 에서 6 종의 석탄의 화염전파속도를 나타내고 있다. 산소 농도는 20%부터 80%까지 변화시켰다. 산소 농도의 변화에 따라 각 미분탄의 화염전파속도의 증가는 선형적으로 나타났으며, 산소농도가 높은 경우 화염전파속도가 높게 나타났다. 산소의 농도가 5% 증가할 경우, 화염전파속도의 증가율은 평균 Roto(m) 1.65%, Daedong 1.79%, A.B.K-1 1.91%, Bengalla 1.86%, A.B.K 1.84%, Jembayan 1.79%로 나타났다. 또한, 산소농도 관계없이 Jembayan 의 화염전파속도가 가장 빠르고, A.B.K-1 이 가장 느리게 나타났다. 이는 Table 1 에 나타난 석탄 물성치의 영향으로 사료된다. 활성화 에너지가 큰 Roto(m), A.B.K, A.B.K-1 의 경우, 상대적으로 활성화 에너지가 작을 수록 화염전파속도가 빠르게 나타났고, 활성화

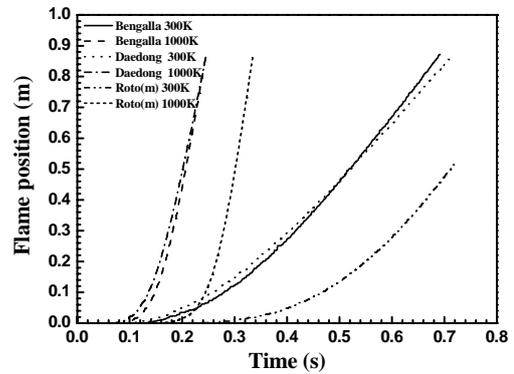


Fig. 3 Flame position according to surrounding gas temperature ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

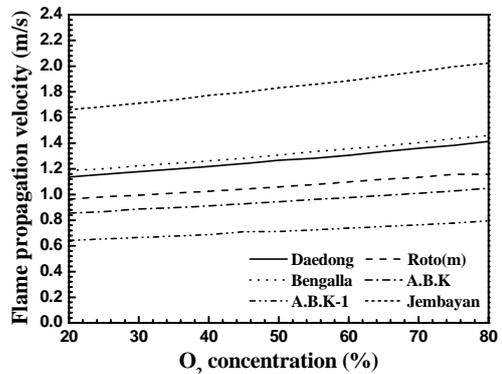


Fig. 4 Flame propagation velocity according to O_2 concentration ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

에너지가 작은 Jembayan, Bengalla, Daedong 의 경우, Jemabayan, Daedong 의 활성화 에너지가 거의 같지만, Daedong 의 화염전파속도가 더 느리게 나타났다. 이는 Daedong 의 휘발분 함량이 더 낮기 때문이라 사료된다. 한편, 휘발분의 함량이 비슷한 A.B.K, A.B.K-1, Jembayan 의 경우, 활성화 에너지가 작은 Jembayan 이 다른 석탄 비해 화염전파속도가 2 배 이상 빠르게 나타났다.

Fig. 5 는 주위가스의 온도 300K, 산소농도 20% 에서 80%까지의 조건에서, 1 차원 화염전파 모델의 200 번째 요소에서 미분탄 입자의 온도변화를 나타낸다. 석탄으로는 Roto(m)을 사용하였다. 산소의 농도가 증가할수록 입자의 온도가 상승하였다. 또한, 미분탄 입자의 착화 시간 역시 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 열 용량이 큰 CO₂ 의 농도가 감소하였기 때문이라 사료된다.

Fig. 6 은 기체의 온도 및 O₂ 농도에 따른 화염전파속도를 나타내고 있다. 산소 농도는 20% ~ 80% 하였으며, 기체온도는 300K, 500K, 700K, 1000K

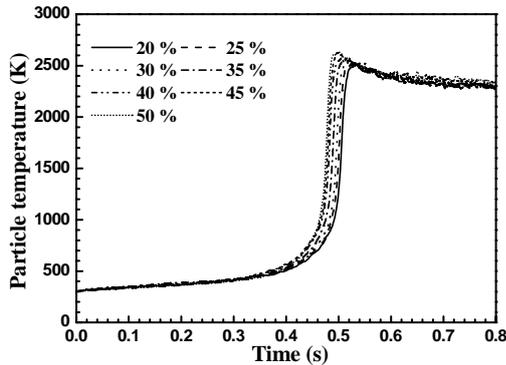


Fig. 5 Particle temperature according to O₂ concentration ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration = 0.5 kg/m^3)

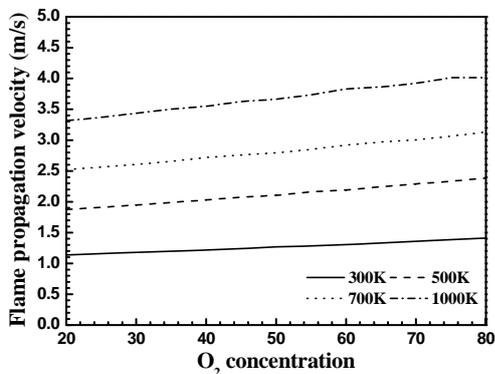


Fig. 6 Flame propagation velocity according to changing surrounding temperature ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

으로 하였다. 기체온도가 증가함에 따라 화염전파속도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 주위기체의 온도가 증가함에 따라 미분탄 입자의 착화 시간은 짧아지며, 이에 따라 화염은 빠르게 전파되며, 화염전파속도가 증가하기 때문이다. 한편, 기체 내의 산소농도가 증가함에 따라 화염 전파는 더 빠르게 나타났다. 즉, 산소 농도 증가에 따라 열 용량의 큰 CO₂ 농도가 감소하게 되어 미분탄 입자의 착화 시간이 단축되기 때문에 화염전파속도가 빨라지게 되는 것이라 사료된다. 이러한 산소농도의 영향은 주위 기체가 고온일 때, 더 뚜렷하게 나타났다. 이것은 고온의 기체 조건에서는 미분탄의 온도 상승 및 휘발화가 빠르게 일어나고, 화염전파를 저해하는 CO₂ 농도의 감소가 동시에 영향을 미치기 때문이라 사료된다.

3.2 석탄 물성치의 영향

미분탄의 활성화 에너지, 입경 등과 같은 석탄 물성치와 석탄 농도에 따른 화염전파속도의 변화를 해석하였다.

Fig. 7 은 주위기체 온도 300K, 산소농도가 40% 인 조건에서, 6 종 석탄의 시간에 따른 화염의 위치를 나타내고 있다. 최초 화염 발생 시기는 Jembayan, Daedong, Bengalla, Roto(m), A.B.K, A.B.K-1 순으로 나타났다. 이는 Table 1 의 석탄 물성치 중 활성화 에너지의 크기 순서와 일치 하였다. 즉, 화염의 최초 발생 시기는 석탄의 활성화 에너지가 작을수록 빠르게 나타난다. 석탄의 연소과정은 입자의 가열에 의한 탈 휘발 과정과 char 반응과정으로 나누어 지는데, 활성화 에너지가 큰 석탄은 활성화 에너지가 작은 석탄보다 입자의 가열에 의한 탈 휘발 과정과 char 반응이 일어나기 위해 더 많

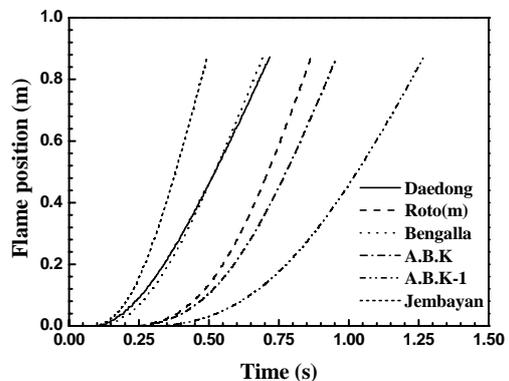


Fig. 7 Flame position for each coal according to time variation ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

은 에너지가 필요하다. 따라서 활성화 에너지가 큰 석탄의 경우 초기 화염 발생 시기가 늦어지게 된다. 그리고 이 영향으로 화염전파속도 역시 감소 하게 된다.

Fig. 8 은 주위기체의 온도 300K, 산소농도 40% 인 조건에서, 석탄의 활성화 에너지에 따른 화염 전파속도 변화를 나타낸 것이다. 활성화 에너지는 40 kJ/mol 에서 80 kJ/mol 까지 변화시켰다. 전반적으로 화염 전파 속도는 Roto(m)의 경우 가장 빠르며, A.B.K, Jembayan, A.B.K-1, Bengalla, Daedong 순으로 나타났다. 이는 Table 1 의 휘발분량의 순서와 동일하다. 즉, 휘발분이 많이 포함된 경우 화염전파속도가 더 크게 나타난다. 한편, 휘발분에 의한 화염전파속도의 차이는 활성화 에너지가 작은 경우 더 크게 나타났다.

Fig. 9 는 주위기체온도 300K, 산소농도 40 % 인 경우, 미분탄 입경에 따른 화염전파속도를 나타내고 있다. Roto(m)이 사용되었으며, 50 μm 와 100 μm 의 두 가지 크기의 입경이 사용되었다. 미분탄 입

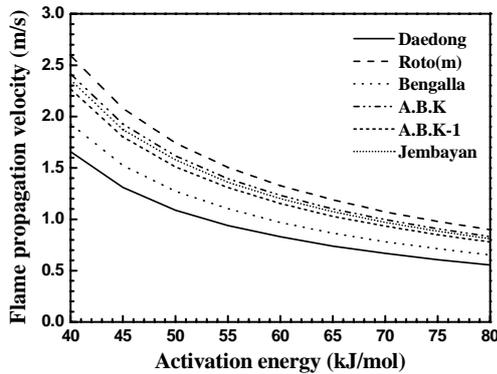


Fig. 8 Flame propagation velocity according to changing activation energy ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

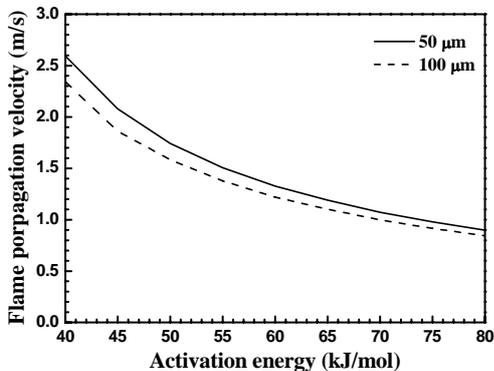


Fig. 9 Flame propagation velocity according to coal particle size (Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

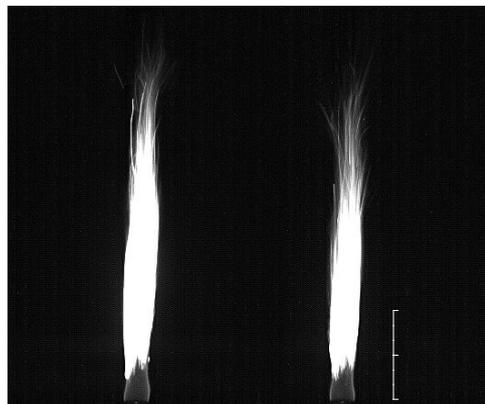
경이 50 μm 인 경우가 100 μm 인 경우보다 화염 전파속도가 더 높게 나타났다. 이는 입경이 작아짐에 따라 같은 석탄 농도인 경우 석탄의 총 표면적이 증가하게 되고, 휘발분 연소에 따른 온도 증가와 요소로 전달된 복사열 및 주위기체와의 열전달 및 화학 반응이 활발해지기 때문이라 사료된다. 한편, 입경차이에 따른 화염전파속도의 차이는 활성화 에너지가 증가함에 따라 감소하였다.

Table 3 은 6 종 석탄의 입경의 증가에 따른 화염전파속도의 변화를 나타내고 있다. 활성화 에너지가 가장 작은 Jembayan 이 화염전파속도 감소율이 가장 크며, 활성화 에너지가 가장 큰 A.B.K-1 이 화염전파속도 감소율이 가장 작다. 즉, 활성화 에너지가 증가함에 따라 입경의 영향이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10 은 석탄의 입경에 따른 화염변화의 실험 결과이다. 이중관 형식의 slit 버너가 사용되었으며, 버너의 외각으로는 보염을 형성 하기 위해 메탄이 1.8 L/min 으로 공급되고, carrier-gas 로 공기가 이용되었다. 공기는 25 L/min, 미분탄은 0.32 g/min 공급되었다. 미분탄의 입경은 32 μm 와 165 μm 두 가지가 고려되었다. 평균 화염 길이는 32 μm 입경의 미분탄의 경우 130.6 mm, 165 μm 입경의 경우 145.6 mm 이다. 이는 입경이 작은 경우 Fig. 9 와 Table 3 의 결과와 같이 화염전파속도가 빨라지게 되어, 화염의 길이가 짧아지기 때문이다.

Table 3 Decrease rate of flame propagation velocity (m/s) according to coal particle diameter

Coal \ Diameter	50 μm	100 μm	Velocity decrease rate(%)
Daedong	1.22	1.15	5.74
Roto(m)	1.01	0.94	6.93
Bengalla	1.26	1.19	5.56
A.B.K	0.91	0.86	5.49
A.B.K-1	0.69	0.66	4.35
Jembayan	1.78	1.60	10.11



(a) $D_p=165 \mu\text{m}$ (b) $D_p=32 \mu\text{m}$

Fig. 10 Images of pulverized coal flame

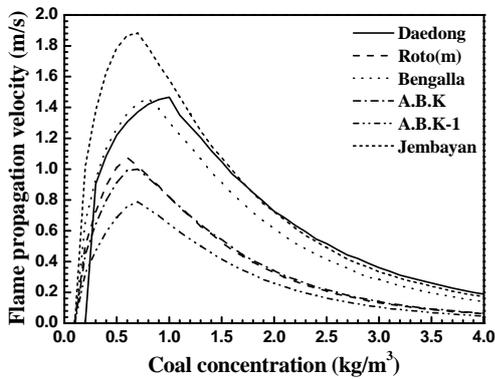


Fig. 11 Flame propagation velocity according to changing coal concentration ($D_p=50 \mu\text{m}$, Coal concentration= 0.5 kg/m^3)

Fig. 11 은 석탄 농도변화에 따른 화염전파속도를 나타낸 것이다. 주위기체의 온도는 300K, 산소 농도는 40%이고, 석탄 농도는 $0.1 \text{ kg/m}^3 \sim 4.0 \text{ kg/m}^3$ 이다. 석탄 농도가 낮은 조건에서는 6 종 석탄 모두 석탄의 농도가 증가됨에 따라서 화염전파속도가 급격히 상승하고 이후 화염전파속도는 최대값을 나타내고 감소하기 시작한다. 석탄의 농도가 낮은 경우에는, 농도가 증가할수록 미분탄 입자의 거리가 가까워 짐에 따라 각 미분탄 착화에 의해 발생한 열이 주위 입자로 활발하게 전달되어 화염전파속도가 빨라지지만, 석탄의 농도가 높은 경우에는 석탄 수밀도의 증가에 의해 주위기체의 열이 많은 수의 미분탄 입자로 전달되어야 하기 때문에 열 전달이 각각의 미분탄 입자로 분산되어 전달되기 때문에 화염전파속도가 감소하게 된다. 한편, 석탄의 종류에 따라서 최고 화염전파속도일 때의 석탄농도가 다르게 나타났다. Roto(m)의 경우 0.6 kg/m^3 , A.B.K, A.B.K-1, Jembaya 의 경우 0.7 kg/m^3 , Bengalla 는 0.8 kg/m^3 , Daedong 1.0 kg/m^3 일 때 최대 화염 전파 속도가 나타났다. 즉, 휘발분이 많이 포함된 석탄의 경우 상대적으로 낮은 석탄농도에서 최대 화염전파속도가 나타났다. 이는 휘발분량이 많은 경우, 휘발분 연소에 의한 미분탄 및 기체 온도 증가에 의한 것으로 사료된다.

4. 결론

미분탄 순산소 연소에서 화염전파속도에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 수치적인 연구가 수행되었다. 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

4.1 주위 기체의 영향

- (1) 순산소 연소 조건에서 화염전파속도는 공기 연소 조건에서보다 느리게 나타났다.

- (2) 산소 농도가 증가함에 따라서 입자의 온도가 상승하였으며, 초기 착화 시간이 감소하고, 평균 화염전파속도가 증가하였다.
- (3) 산소농도의 증가에 따른 화염전파속도는 증가하였으며, 이는 고온에 기체 온도에서 더 뚜렷하게 나타났다.

4.2 석탄 물성치의 영향

- (1) 활성화 에너지가 큰 경우 미분탄 입자의 착화가 지연되었으며, 화염전파속도 역시 감소하였다. 또한, 휘발분을 함량이 높을 수록 화염전파속도가 증가하였다.
- (2) 석탄농도의 증가에 따라 낮은 농도 범위에서는 화염전파속도가 증가하다 최대값을 나타내며, 그 이후 화염전파속도는 감소하였다.
- (3) 미분탄의 입경이 감소함에 따라 석탄 입자 화염전파 속도가 증가하였다.

후 기

이 논문은 에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업의 지원에 의하여 연구 되었음. (20070912000)

참고문헌

- (1) Turn, S. R., 1999, "An Introduction to Combustion," McGRAW international edition.
- (2) Ann, K. Y., Lee, S. M. and Lee, Y. D., 2006, "Application of Oxyfuel Combustion to Power Generation System," SAREK, pp. 370~375.
- (3) Cho, C. P., Kim, H. Y. and Chung, J. T., 2005, "Effect of Coal Particle Array on Coal Combustion," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 12, pp. 1321~1328.
- (4) Ponzio, A., Senthorsevan, S., Yang, W., Blasiak, W. and Eriksson, O., 2008, "Ignition of Single Coal Particles in High-temperature Oxidizers with Various Oxygen Concentration," *Fuel*, Vol. 87, No. 6, pp. 974~987.
- (5) Bejarano, P. A. and Levendis, Y. A., 2008, "Single-Coal-Particle Combustion in O_2/N_2 and O_2/CO_2 Environments," *Combustion and Flame*, Vol. 153, No. 1-2, pp. 270~287.
- (6) Toshiyuki, S., Katsumi M., Jun'ichi, S., Akio, Y. and Ken, Okazaki., 2007, "Effect of Carbon Dioxide on Flame Propagation of Pulverized Coal Clouds in CO_2/O_2 Combustion", *Fuel*, Vol. 86, No. 12-13, pp. 2008~2015.
- (7) Taniguchi, H., Yang, W., Kudo, K., Kuroda, A. and Mochidda, A., 1994, "Radiative Heat Transfer Analysis by the Monte Carlo Method Using Personal Computer Software," CORONA Publishing.
- (8) Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983,

- “Absorption and Scattering of Light by Small Particles,” *Wiley-interscience*.
- (9) Hottel, H. C., Sarafim, A. F. and Fahimian, E. J., 1967, “The Role of Scatter in Determining the Radiative Properties of Surfaces,” *Solar Energy*, Vol. 11, No. 1, pp. 2~13.
- (10) Hottel, H. C. and Sarafim, A. F., 1967, “Radiative Transfer,” *McGraw-Hill*.
- (11) Maraki, J. G., Papapavlou, C. and Karas, E., 2000, “A Parametric Study of Radiative Heat Transfer in Pulverized Coal Furnace,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 16, pp. 2961~2971.
- (12) Takesh, M. and Okazaki, K., 1987, “Coal Combustion,” *Hemisphere Publishing Corporation*.
- (13) Otero M., Calvo, L.F., Gil, M.V., García, A.I. and Morán, A., 2008, “Co-combustion of Different Sewage Sludge and Coal: A Non-isothermal Thermogravimetric Kinetic Analysis,” *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 14, pp. 6311~6319.
- (14) Edwige S. E., Gang Y. and Tim M., 2005, “A Simple Kinetic Analysis to Determine the Intrinsic Reactivity of Coal Chars,” *Fuel*, Vol. 84, No. 14-15, pp. 1920~1925.
- (15) Vuthaluru, H. B., 2004, “Investigations into the Pyrolytic Behaviour of Coal/Biomass Blends using Thermogravimetric Analysis,” *Bioresource Technology*, Vol. 92, No. 2, pp. 187~195.