

## 아 역청탄 좌 산화 반응속도론에 관한 실험적 연구

강기태\* · 송주헌\*\* · 이천성\* · 장영준\*\* · 전충환<sup>1)</sup>

\*부산대학교 기계공학부 대학원, \*\*부산대학교 기계공학부  
(2009년 6월 29일 접수, 2009년 11월 26일 수정, 2009년 11월 26일 채택)

### A Experimental Study of Oxidation Kinetics for a Sub-Bituminous Coal Char

Ki Tae Kang\*, Ju Hun Song\*\*, Chuen Sueng Lee\*, Young June Chang\*\* and Chung Hwan Jeon

\*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

\*\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 29 June 2009, Revised 26 November 2009, Accepted 26 November 2009)

#### 요 약

본 논문에서는 주위 가스 온도와 체류시간에 따른 아 역청탄 좌 입자의 연소 특성에 관한 기본적인 연구를 진행하였다. 실험용 장비로써 노 내 온도 범위가 900°C에서 1400°C까지 조절이 가능한 DTF(drop tube furnace)를 설치하였고, 온도가 보정된 two color pyrometer를 DTF의 상부에 장착하여 좌가 산화할 때의 입자 온도를 측정할 수 있게 하였다. 좌 산화 시 반응한 총 질량을 구하기 위해 열중량 분석기를 사용하였으며, 회분 추적법을 통해 분석하였다. 이를 통해 대기압 조건에서 좌가 산화 할때 질량 및 면적 반응성, 반응속도 상수들을 결정하였다.

**주요어** : 좌, 산화 반응속도론, DTF (Drop Tube Furnace), 회분 추적법

**Abstract**—A fundamental investigation has been conducted on the combustion of single particle of a sub-bituminous coal char burning at different temperatures and residence times. The lab-scale test setup consisted of a drop tube furnace where gas temperatures varied from 900°C to 1400°C. A calibrated two color pyrometer, mounted on the top of the furnace, provided temperature profiles of luminous particle during a char oxidation. An amount of char mass reacted during the reaction is measured with thermogravimetry analyzer by using an ash tracer method. As a result, mass and area reactivity as well as reaction rate coefficients are determined for the char burning at atmospheric pressure condition.

**Key words** : Char, Oxidation Kinetics, DTF (Drop Tube Furnace), Ash Tracer Method

#### 1. 서 론

석탄은 세계 에너지 소비량의 급격한 증가에 따라 화석 연료 중 보존량이 풍부하고 가격이 저렴하여 주요한 에너지원으로 새롭게 인식되고 있다. 하지만 석탄을 실

제 발전 및 산업 분야에 사용함에 있어서 기술적, 환경적으로 많은 문제들이 발생하고 있다. 더욱이 우리나라는 산업용, 발전용 석탄을 전량 외국으로부터 수입을 하고 있는 실정하기에 여러 나라에서 수입되는 다 탄종의 연소 특성에 대한 이해 부족으로 인해 많은 문제점들이 부각되고 있다. 실험적 연구를 통한 기본적인 석탄 연소 반응 과정에 대한 보다 나은 이해는 석탄을 에너지 자원으로써 효율적이고 청정하게 사용하게 하는 것뿐만 아니라 기술적, 환경적인 문제점들을 해결하는데 좋은 대안이 될 수 있을 것이다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

부산대학교 기계공학부  
Tel : 051-510-3051  
E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

특히 좌 연소는 석탄 연소 과정 중 가장 느린 단계로 대부분의 연소 시간을 차지하며, 좌 연소의 불 균일 반응 과정은 연소 후 미연분의 량에 영향을 미치는 중요한 단계라고 할 수 있다. 따라서 석탄 연소가 일어나는 장치의 연소 효율을 향상시킬 때와 새로운 연소 시스템을 설계하고자 할 때 좌 산화반응속도가 가장 큰 관심의 대상이 된다.

외국의 경우, 자국 석탄의 좌 산화에 관한 많은 연구가 이루어져 있다. 특히, Laurendeau, Essenhigh, Smith and Smoot에 의해 광범위한 연구가 진행된 상태이다. 위 선행 연구자들의 의해 알려진 좌의 산화과정은 아래와 같다.<sup>1-5)</sup>

1. 좌 입자 주위 경계층을 통한 반응물, 생성물의 질량과 열의 확산
2. 좌 입자의 기공으로 질량과 열의 확산
3. 노출된 좌 입자 표면에서의 산소와 탄소의 불 균일 반응

이에 본 논문은 위의 좌의 산화 과정의 이해를 바탕으로 좌 산화반응속도론을 구하기 위해 아래와 같은 실험 목적을 세웠다. 첫 번째, Two-color pyrometer를 이용하여 산화 시 좌 입자의 온도를 측정하는 것이다. 두 번째, 대기압 상태에서 온도와 체류 시간에 따른 질량(mass reactivity) 및 면적 반응성(area reactivity)을 구하는 것이다. 마지막으로 반응 차수와 표면 반응성 값에 의한 반응속도상수들을 결정하는 것이다.

## 2. 이론 해석

### 2-1 좌 산화 모델 (Char oxidation model)

좌 산화 모델은 좌 표면적에서 일어나는 좌 산화반응의 속도에 관한 것이다. 내부 기공(pore)들의 상호 작용과 기공 내 산소 확산과 화학반응속도 해석의 어려움으로 내부에서 일어나는 연소반응은 고려하지 않았지만, 대부분의 좌 연소를 예측하는 모델로 널리 사용되고 있는 모델이다. 좌 산화모델은 정상 상태와 단막 연소(single film burning) 과정을 가정하며 질량 보전 방정식과 표면 반응속도론 방정식을 동시에 만족한다.<sup>5-6)</sup>

기체 중의 산소가 좌 입자 주위의 경계층으로 확산될 때 탄소가 산화되는 반응을 아래의 식으로 표현할 수 있다. 이 식은 표면 반응에 의한 CO 와 CO<sub>2</sub> 생성과 Stefan flow 내의 질량확산을 모두 고려하고 있다.

(1)식은 좌 표면에서 일어나는 탄소와 산소의 화학반응식이다. (2)식은 표면에서의 화학종의 확산에 의해 유도된 식으로써 실험으로 측정된 입자의 온도와 입자의 크기, CO<sub>2</sub> 생성비, 탄소 산화률을 통해 원하는 표면산

소분압을 예측할 수 있게 한다.

$$C + \left(\frac{1+\psi}{2}\right)O_2 \rightarrow (1-\psi)CO + \psi CO_2 \tag{1}$$

여기서  $\psi$  : CO<sub>2</sub> 생성비

$$q_a = \left(\frac{2}{1+\psi}\right) \left(\frac{P}{R_u T_m}\right) \left(\frac{M_c D_c}{\gamma}\right) \left(\frac{2}{d_p}\right) \times \ln\left(\frac{1-\gamma \frac{P_{O_2,s}}{P}}{1-\gamma \frac{P_{O_2,\infty}}{P}}\right), \text{ 여기서, } \gamma = \frac{\psi-1}{\psi+1} \tag{2}$$

반응기를 지날 때의 좌 입자의 온도는 에너지 방정식에 측정된 좌 산화 반응률( $q_a$ )을 대입하여 반복 계산법을 통해 구할 수 있다. 시간 구간 별로 에너지 방정식을 계산하면 관성 성분의 값이 아주 작을 뿐 만 아니라, 반응 시간이 빨라 입자의 온도를 일정하다고 보면 에러 값도 적다. 따라서 관성 성분을 무시했을 때, 에너지 방정식을 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$0 = -q_a \cdot \Delta h_c + \epsilon \sigma (T_p^4 - T_\infty^4) - h \cdot B_f \frac{(T_p - T_\infty)}{1 - e^{-B_f}} \tag{3}$$

여기서,  $h = \frac{Nu \lambda}{d_p}$

$$B_f = \frac{C_{p,mol} \times q_a (1-\psi)}{h M_c} \tag{4}$$

Stefan flow 는 Blowing 계수(Bf)에 의해 설명되어진다. 반응열은 CO<sub>2</sub> 생성비에 따라 달라진다.

$$\Delta h_c = \frac{(26.4(1-\psi) + 94.03\psi)}{12} \tag{5}$$

Arthur<sup>6)</sup>에 의해 제안된 CO<sub>2</sub>와 CO 생성비는 입자 온도 함수로 표현할 수 있다.

$$\frac{1-\psi}{\psi} = A_c \exp\left(-\frac{E_c}{R_u T_p}\right) \tag{6}$$

### 2-2 좌 산화 반응률 및 반응속도상수 결정법

본 논문에서는 탄소 산화 반응률을 결정하는데 있어

회분 추적법(Ash tracer method)을 사용하였다.

회분 추적법은 TGA(모델명: TA Q600 SDT)를 이용해 산화 전후의 촉의 공업 분석 결과를 토대로 산화한 탄소의 질량을 구하는 방법이다. 회분 추적법은 반응이 진행되는 동안 회분은 반응하지 않는다는 가정 하에서 반응전후의 고정탄소 질량의 변화를 알 수 있다. 산화 후 촉을 공업분석 했을 때 회분의 분율( $\eta_{a,0}$ )과 질량( $m_{a,t}$ )을 통해 산화 전 촉의 총 질량( $m_0$ )을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_0 = m_{a,t} / \eta_{a,0} \quad (7)$$

산화 전 촉의 총 질량( $m_0$ )과 산화 전 촉의 고정 탄소 분율( $\eta_{c,0}$ )을 통해 산화 전 촉의 고정탄소 질량( $m_{c,0}$ )을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$m_{c,0} = m_0 \times \eta_{c,0} \quad (8)$$

이렇게 구한 산화 전후 촉의 고정탄소 질량 차이가 반응한 고정탄소의 질량이 된다.

$$\Delta m_c = m_{c,0} - m_{c,t} \quad (9)$$

이렇게 구한 반응한 고정탄소질량에 체류시간과 반응 전후의 평균 표면적을 나누어 탄소 산화반응률( $q_c$ )을 결정한다. 앞서 구한 탄소 산화반응률과 식 (2)로부터 구한 표면산소분압을 아래 식 (10)인 실험적인 n-th

차수 속도 방정식에 대입하여 반응속도상수( $k_c$ )를 구할 수 있다.

$$q_a = k_c \cdot P_{o_2}^n, \quad (10)$$

여기서,  $k_c = A_c \exp(-\frac{E_c}{R_u T_p})$

### 3. 실험 장치

#### 3-1 실험 장치 구성

전체적인 실험장비의 구성은 Fig. 1 과 같다. 반응기는 DTF로써, DTF는 크게 세 가지 부분으로 나눌 수 있다. 주입부와 반응부, 포집부이다. 주입부는 연료와 반응 가스를 투입하는 부분이다. 반응 가스는 연료를 운반하는 운반 가스와 운반가스가 흐르는 튜브의 주위로 투입되는 주 반응가스가 있다. 시린지 펌프(sylinge pump)로 이루어진 공급 시스템(Feeder system)과 유량 조절기와 유량계를 통해서 연료의 양과 총 반응 가스의 양을 조절할 수 있게 하였다. Fig. 2는 연료 공급 시스템의 계약도이다.

또한 Fig. 1과 같이 DTF의 주입부 상단에는 광학 계측이 가능할 수 있도록 제작되어 있다. 광학 장비는 DTF 반응부에서 입자가 연소할 때 나오는 방사 에너지를 측정하여 최종적으로 입자의 온도를 구할 수 있다. Two color pyrometer에 사용된 band pass filter 는 650 nm 와 700 nm이다. 또한 Photo-multiplier tube와 Memory Hi-corder (800kHz/Sa), 고전압 증폭기(~1kV), 전류 조

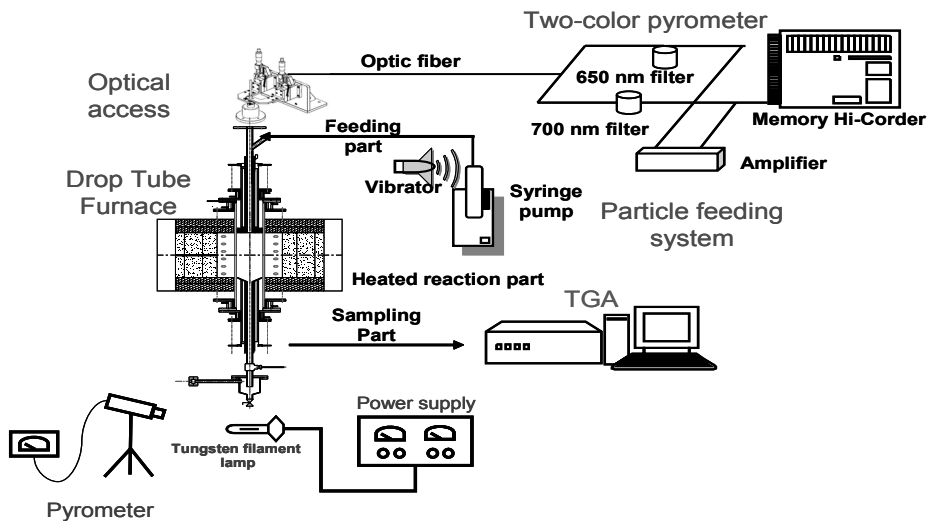


Fig. 1. Schematic diagram of char oxidation experiment.

절기(Current controller)로 구성되어 있다.

반응부는 연료와 반응 가스가 만나 화학반응이 일어나는 곳이다. 온도 조절기를 통해 SiC heater 의 온도를 조절하여 반응부에 일정한 온도장을 형성하게 한다. DTF는 최대 1500 °C까지 온도를 형성할 수 있게 했다. 반응부의 길이는 최대 200 mm, 최소 50mm로써 프루브 상하 이동을 통해 조절이 가능하다.

포집부는 반응물을 포집하는 부분이다. 추가적인 좌산화 반응을 차단하기 위해 포집 프루브에 냉각수를 흘려 튜브 내 온도를 하강시켰다. 하단부 사이클론을 이용하여 가스와 입자를 분리할 수 있게 하였다.

3-2 실험 조건

3-2-1 좌 준비 조건

좌는 석탄을 열분해(pyrolysis)하여 만들어 진다. 석탄은 인도 수입탄인 Rotomiddle (RM), 아역청탄이다. 석탄의 크기는 150~180µm이다. Table 1은 RM 원탄의 공업분석 결과와 열분해과정을 통해 생성된 RM\_char의 공업분석 결과를 보여주고 있다. 좌를 만들기 위한 DTF 내부의 분위기는 질소로만 구성되어야 한다. 석탄 열분해의 실험 조건은 Table 2와 같다. 다음과 같은 실험조건에서는 일정한 성분비율을 가진 좌

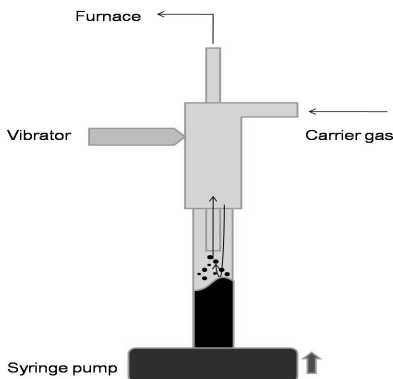


Fig. 2. Schematic diagram of a particle feeding system.

Table 1. Proximate analysis of a RM coal and a RM char

Proximate Analysis	RM (Sub-bituminous)	RM_char
Moisture(%)	12.62	1.42
Volatile(%)	46.65	5.21
Ash(%)	2.74	5.63
Fixed Carbon (%)	37.99	87.74

가 생성되어진다.

3-2-2 좌 산화 조건

열분해를 통해 생성된 좌를 연료로 해서 산화실험을 진행하였다. 열분해와는 달리 좌 산화 실험은 산화 반응을 일으킬 수 있도록 공기를 주반응가스로 DTF 내에 주입하였으며, 체류 시간은 0.62초와 3.72초로 두 조건을 설정하였고, 노내 온도는 900°C, 1100°C, 1400°C로 각각의 온도에서 좌 산화 반응을 측정하였다. 좌 산화 실험조건은 Table 3에 나와 있다.

3-2-3 공업분석 조건

TGA(모델명: TA Q600 SDT)를 사용하여 공업분석을 수행하였다. 공업분석은 총 3단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계에서는 수분, 두 번째 단계에서는 휘발성분, 세 번째 단계에서는 고정탄소의 질량 감소분을 확인할 수 있었다. 첫 번째 단계에서는 질소 분위기에서 온도를 107°C까지 상승시키고, 두 번째 단계에서는 질소 분위기에서 온도를 950°C까지 상승시키고, 마지막으로 공기 분위기에서 750°C까지 상승시켜 질량 감소분을 확인한다.

Table 2. Experimental conditions of coal pyrolysis

Fuel	RM Coal
Main gas (l/min)	Nitrogen 2
Carrier gas (l/min)	Nitrogen 1
Pressure (atm)	1
Feeding rate(g/min)	0.09 (Syringe pumping rate 7 ml/ min)
Residence time (seconds)	6.2
Setting Temperature(°C )	1300

Table 3. Experimental conditions of char oxidation

Fuel	RM_char (120µm)
Main gas (l/min)	Air 4
Carrier gas (l/min)	Nitrogen 1
Oxygen concentration in bulk gas (%)	16.8
Pressure (atm)	1
Feeding rate(g/min)	0.03 (Syringe pumping rate 3 ml/ min)
Residence time (seconds)	0.62 and 3.72
Setting Temperature(°C )	900, 1100, 1400

### 4. 실험 결과

#### 4-1 입자 온도 (Particle temperature)

좌 입자의 온도를 측정하기 위해 DTF 전용 two-color pyrometer를 설계하였다. 먼저 DTF에서 연소되는 입자의 온도를 측정하기 전에 DTF 전용 two-color pyrometer의 calibration을 수행하였다. Calibration의 결과는 Fig. 3와 같다. Fig.1에 나와 있듯이 Calibration 과정은 텅스텐 램프와 two color pyrometer(모델명: Metis MQ 11)와 DTF 전용 two color pyrometer을 이용하였다. 전압에 따른 텅스텐 램프의 온도를 two color pyrometer(모델명: Metis MQ 11)로 먼저 측정 한 다음 DTF 전용 two color pyrometer를 통과한 빛을 650nm 와 700nm 파장의 필터에 통과시킨 신호를 Memory Hi-corder로 측정한다. 650nm 와 700nm의 빛 강도 비에 따른 온도를 통해 calibration 선을 구할 수 있다.<sup>7),8)</sup>

Fig. 4은 Two-color pyrometer의 원 신호이다. 원 신호는 많은 잡음을 포함하고 있기 때문에 Low pass filter

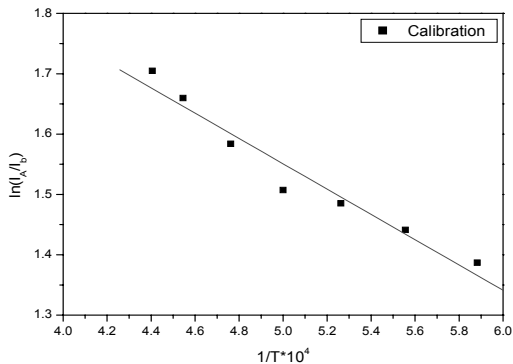


Fig. 3. The calibration chart of two-color pyrometer.

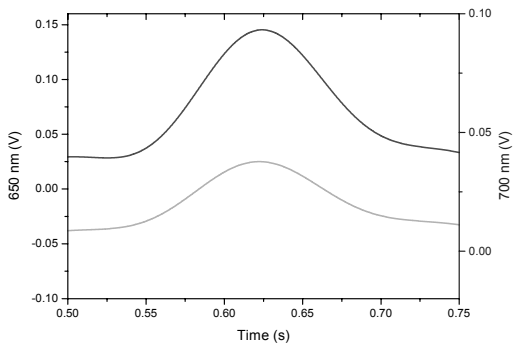


Fig. 4. The example of raw data in two-color pyrometer for roto\_char at the particle temperature of 1710.1 °C

를 이용하여 제거하였다. 측정된 평균 입자 온도와 계산한 평균 입자 온도에 대한 결과 값을 Table 4에 비교하여 나타내었다. 이론적인 입자온도의 계산은 식 (3)인 에너지 방정식에 측정된 좌 산화 반응률을 대입하여 반복계산을 통해 구할 수 있었다. 전체적으로 가스 온도가 상승함에 따라 입자 온도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한 측정된 입자온도는 계산된 입자온도보다 가스온도의 영향이 적은 것으로 나왔는데 이것은 실험에 사용된 좌에 고정탄소 뿐 만 아니라 수분, 회분, 휘발분이 소량 포함되어 있어 온도 상승을 지연시킨 것으로 보인다.

#### 5-2 좌 산화 반응성 (Char oxidation reactivity)

좌의 반응성은 질량 반응성(Mass reactivity)과 면적 반응성(Area reactivity)으로 표현 할 수 있다. 질량 반응성(Mass reactivity)의 물리적 의미는 반응하기 전의 탄소 질량에 대한 체류 시간 동안 반응한 탄소의 질량 변화율을 뜻한다. 면적 반응성(Area reactivity)의 물리적 의미는 반응하기 전 좌의 표면에 대한 체류 시간 동안 반응한 탄소의 질량 변화율을 뜻한다.<sup>4),10)</sup>

Fig. 5와 6은 온도와 체류시간에 따른 질량과 면적 반

Table 4. Average particle temperature as function of gas temperature

	Rotomiddle char		
Gas temperature [°C]	900	1100	1400
Measured particle temperature [°C]	1504.9	1616.7	1710.1
Predicted particle temperature [°C]	1329	1511.6	1888.2

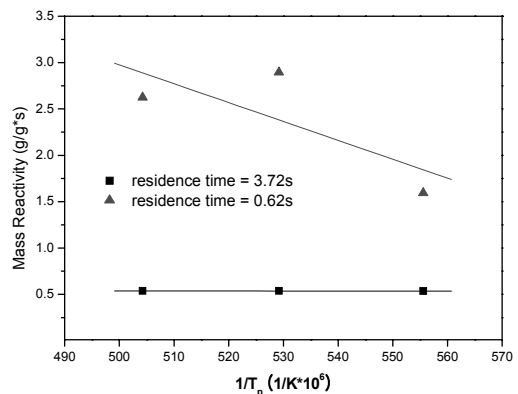


Fig. 5. Measured mass reactivities as function of particle temperature for the Roto\_char

응성을 각각 나타낸 것이다. 질량 반응성의 경우 체류 시간이 0.62초일 때 반응성이 대체로 높게 나왔고 고온으로 갈수록 탄소 반응성이 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 이것은 질량 반응성과 면적 반응성의 공통점으로 온도가 증가할수록 탄소 반응성이 증가하는 일반적인 현상이다. 또한 체류 시간이 3.72초일 때는 질량 반응성의 변화가 거의 없는데, 이것은 온도에 상관없이 3.72초 동안 좌의 탄소 성분이 모두 산화되었다는 것을 뜻한다. 면적 반응성과 질량 반응성은 비슷한 경향을 보이고 있다. 하지만 질량 반응성의 경사가 조금 더 가파른 것을 알 수 있는데, 이는 직경 변화를 일으키는 표면연소와 함께 질량변화를 수반하는 내부 연소가 동시에 일어난다고 볼 수 있다.

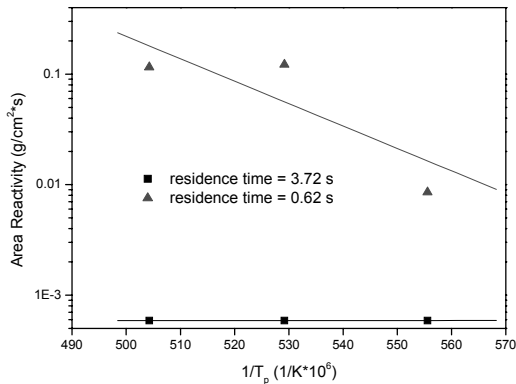


Fig. 6. Measured area reactivities as function of particle temperature for the Roto\_char

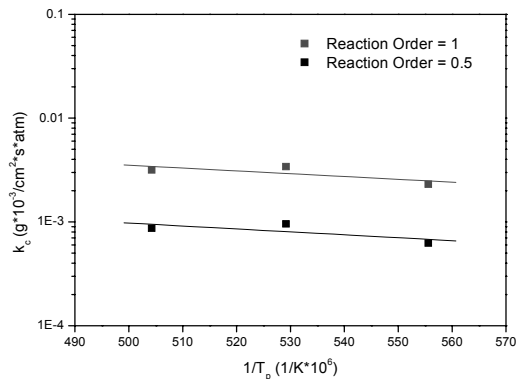


Fig. 7. Measured oxidation rate coefficient for Roto\_char as function of temperature with two apparent reaction orders

### 5-3 좌 산화 반응속도상수 (Char oxidation rate coefficient)

반응속도상수(reaction rate coefficient), kc는 좌 산화 모델과 n-th 차수 속도방정식 (nth-order rate equation)을 통해 구할 수 있다. 면적 반응성(area reactivity)에 총괄 좌 산화 모델을 통해 구한 표면 산소 분율을 나누어서 좌 산화 반응속도상수를 구한다. 반응 차수(n)는 예전 연구자들이 사용한 값과 일치한 0.5 와 1을 선택하여 계산해 보았다. Fig. 7는 RM\_char에 대한 kc의 Arrhenius plot을 한 그래프이다. Table 5에 반응속도상수(A)와 활성화 에너지(E)의 값을 정리해 놓았다. Table 6의 입자온도 범위가 1192℃에서 1808℃에서 측정된 BYU 실험값과 비교해 보면, 특히 반응속도상수의 온도특성을 나타내는 활성화 에너지가 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결론

국내 화력발전소에서 사용되어지는 인도 수입탄인 아역청탄 Rotomiddle을 가지고 열분해를 통해 좌를 생성하고, 또 좌 연소 시 입자의 온도를 광학장비를 통해 측정하였으며, 질량과 면적 반응성 및 산화 반응속도상수를 구한 결론은 아래와 같다.

1. 입자 온도는 가스 온도 보다 다소 높게 측정되었으며, 좌 산화 모델을 통해서 계산된 입자온도 값 또한 실험값과 유사한 경향성을 보여주고 있다.
2. 질량 반응성과 면적 반응성 결과 값들을 보았을 때 온도가 증가하면 반응성 또한 같이 증가하는 일반적인 산화 특성을 확인할 수 있었고, 직경 변화를 일으키는 표면 연소와 함께 질량변화를 수반하는 내부 연소가 동시에 일어나는 것을 알 수 있었다.
3. 회분 추적법이 좌 산화 반응률을 구하는데 적절한

Table 5. A variations of kinetic parameters with reaction orders

Apparent Reaction Order (n)	A (g/cm²s)(atm)-n	E (kcal/mol)
0.5	0.0802	12.401
1	0.0249	12.877

Table 6. Kinetic parameters of two char samples (BYU data) for an reaction order of 0.5 (6)

Char	A (g/cm²s)(atm)-n	E (kcal/mol)
70µm UT	1.8	14.8
70µm Pitt.	0.7	12.3

방법임을 확인할 수 있었고, 좌 연소 반응 속도 상수 값들은 앞선 연구자들의 값과 거의 비슷한 범위를 가지고 있는 것을 확인할 수 가 있었다.

### 후 기

이 연구에 참여한 연구자는 2단계 BK21 사업과 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구 결과입니다.

### 사용 기호

$q_a$	탄소(좌) 산화반응률[g/cm <sup>2</sup> · sec]
$\psi$	CO <sub>2</sub> 생성 농도 비
$p_{O_2s}$	표면 산소 분압[atm]
$D_e$	확산 계수[cm <sup>2</sup> /sec]
$d_p$	입자 지름 [cm]
$E_c$	반응활성화 에너지[kJ/mol]
$k_c$	반응속도상수[g/cm <sup>2</sup> ·atm·sec]
$R_u$	이상기체상수[atm·cm <sup>3</sup> /mol·K]
$T_p$	입자 온도 [K]
$T_\infty$	주위 가스 온도 [K]
$T_m$	평균 온도 [K]
$A_c$	반응빈도 인자(frequency factor)
$M_c$	탄소 몰 질량 [kg/kmol]
$Nu$	Nusselt Number
$\Delta h_c$	산화반응열[J/g]
$h$	대류열전달상수[J/sec·K]
$\lambda$	기체 열 전도성[J/cm·sec·K]

### 참고문헌

1. Laurendeau, N.M, "Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, 4, 221~270(1978).
2. Essenhigh, R.H., *Chemistry of coal utilization, second supplement volume*, Jonh Wiley, New York, chapter 19, 1981.
3. Smith, I.W., "The combustion rates of coal char," *19th International symposium on combustion*, The combustion institute, Pittsburgh PA, 1045~1065(1982).
4. Stephen R. Turns, *An Introduction to Combustion : Concepts and Applications*, Mcgraw-Hill Book, 1999.
5. Smoot, L.D, and Smith, P.J, *Coal combustion and gasification*, Plenum Press, New York, 1985.
6. Charles R. Monson, Geoffrey J. Germane, L. Douglas Smoot, "Char oxidation at elevated pressures," *Combustion and Flame*, 100, 669~683(1995).
7. Jeffrey J. Murphy, Christopher R. Shaddix, "Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments," *Combustion and Flame*, 144, 710~729(2006).
8. Dictor, R.A., "Determination of complete tmeperature profiles of singly burning pulverized fuel particles," Massachusetts Institue of Technology, Master Thesis, 1979.
9. Bejarano, P.A., Levendis, Y.A., " Single coal particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments," *Combustion and Flame*, 153, 270~287(2008).

