

## 소결층 내에서의 코크스와 무연탄의 연소 특성 비교 연구

양 원\* · 양광혁\*\* · 최상민\*\*† · 최응수\*\*\* · 이덕원\*\*\* · 김성만\*\*\*

### A Study on the Combustion Characteristics of Coke and Anthracite in an Iron Ore Sintering Bed

Won Yang\*, Kwangheok Yang\*\*, Sangmin Choi\*\*†, Eungsoo Choi\*\*\*, Deog Won Ri\*\*\*, Sungman Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

Coal combustion in an iron ore sintering bed is a key parameter that determines quality of the sintered ores and productivity of the process. In this study, effects of the different types of coal - coke and anthracite - on the combustion in the iron ore sintering bed are investigated by modeling and experiment. Fuel characteristics of coke and anthracite are observed through a set of basic analysis and thermo-gravimetric analysis. Coke has a higher reactivity than anthracite due to the difference of surface area and density, and these characteristics are reflected in the 1-D unsteady simulation of the iron ore sintering bed. Calculation results show that different reactivity of the fuel can affect the bed combustion.

**Key Words** : Combustion, Solid fuel, Modeling, Iron ore sintering bed

#### 기 호 설 명

##### Alphabets

$A_s$  surface area ( $m^2/m^3$ )  
 $C$  molar concentration ( $kmol/m^3$ )  
 $d_p$  particle diameter (m)  
 $E$  activation energy (J/kmol)  
 $kr$  Arrhenius reaction rate (/s)  
 $k_m$  mass transfer coefficient (m/s)  
 $n$  number density ( $m^{-3}$ ); packing parameter  
 $R$  reaction rate  
 $W$  molecular weight (kg/kmol)

##### Greeks

$v$  stoichiometric coefficient  
 $\zeta$  particle area factor  
 $\phi$  surface area factor  
 $\sigma$  intrinsic reactivity

##### Subscripts

eff effective  
 g gas

## 1. 서 론

철광석으로부터 쇳물을 생산해내는 제선 공정에서 석탄은 연료로서 매우 중요한 역할을 수행한다. 제선 공정에서 사용되는 석탄은 코크스이며, 이는 휘발분을 많이 함유하고 있는 무연탄을

코크스 오븐에서 가열하여 탈휘발 과정을 거친 후 생성된 다공성 비휘발성 연료이다. 생성된 코크스는 고로에서 산화철의 환원 및 철광석의 용융을 위한 열원으로 사용되지만 일정 크기 이하의 분코크스는 철광석의 전처리 과정인 소결 공정에서 열원으로 사용되어 왔다.

그러나, 최근 들어서 고가의 코크스 대신에 소결 공정에 저가의 무연탄을 사용하여 소결 에너지 효율을 증가시키려는 시도가 이루어지고 있다. 소결광의 품질이 크게 저하되지 않고 기존

\* 한국과학기술원 기계기술연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* POSCO 기술연구소 제선 연구 그룹

† 연락 저자, 042-869-3030, smchoi@kaist.ac.kr

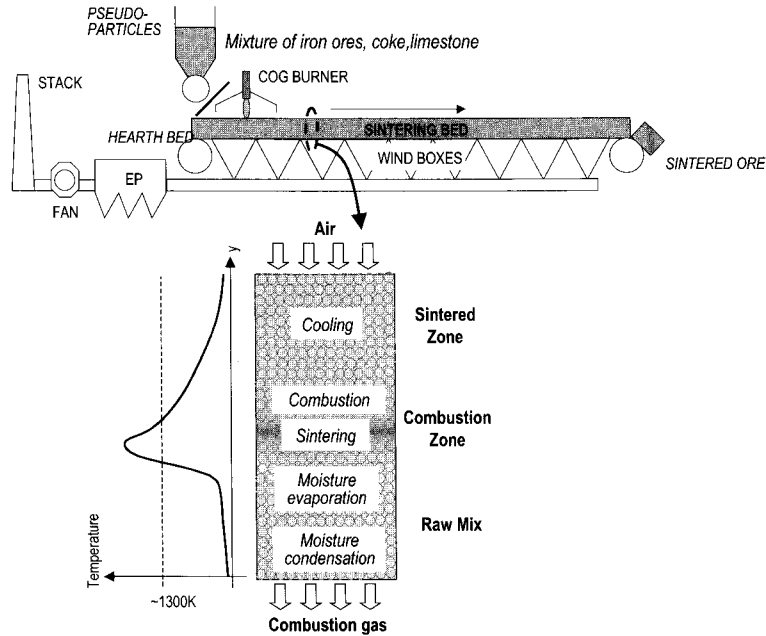


Fig. 1. Combustion process in an iron ore sintering bed

생산성을 유지하면서도 무연탄을 사용하여 경제성 향상의 목표를 달성하기 위해서는 코크스와 무연탄의 연소 특성 차이가 파악되어야 한다. 또한 이러한 연소 특성의 차이가 실제 소결층 내 연소 상황에 어떠한 형태로 반영되는지에 대한 연구가 필요하다.

Figure 1 에는 소결층 내에서 일어나는 고체 연료의 연소 및 제반 현상들에 대하여 나타내었다. 소결층은 80% 이상이 철광석으로 이루어져 있으며, 연료가 차지하는 비율은 4% 내외이다. 철광석의 융점을 떨어뜨리기 위해 석회석이 약 13% 가량 첨가되어 있다. 이러한 고체 원료들이 물과 함께 섞여 회전 드럼에 의해 뭉쳐져 평균 입도 3-4 mm 가량의 의사입자(pseudo particle)를 형성하게 되어 소결층에 장입된다. 약 100 초 가량 가스 버너에 의해 소결층 꼭대기 부분이 가열되어 점화가 이루어지고 나면, 외부 열원없이 연료의 연소가 끝까지 이루어지며, 연소대를 중심으로 하여 철광석의 소결이 이루어진다. 기존 코크스를 사용했을 때의 소결층 내 연소 상황을 예측하고자 하는 시도는 많은 연구자들에 의해 이루어져 왔지만[1-5], 대부분의 연구가 코크스를 연료로 하는 경우에 이루어졌으며, 연료가 무연탄으로 바뀌었을 때의 다른 연소 특성을 모델에 반영하고자 하는 시도는 매우 부족하다.

본 연구에서는 분코크스와 무연탄의 연소 특성을 다양한 분석 방법에 따라 파악하고, 이를

소결층 내 연소 상황 예측 모델에 적용하기 위한 공학적 접근 방법을 제시하였다. 분코크스와 무연탄의 연소 특성 파악을 위해 원소분석, 공업분석, 발열량 분석과 같은 기초 특성 분석과 함께 열중량 분석을 함께 수행하여 반응성의 차이를 규명하였다. 이에 근거하여 서로 다른 특성을 가진 연료를 소결 공정에 적용했을 때의 소결층 내 연소 상황 변화를 예측하였으며, 최적 운전 조건 도출을 위한 방법을 함께 제시하였다.

## 2. 연료 특성 분석

Table 1 에는 코크스와 중국의 D 지역에서 생산되는 무연탄에 대하여 원소 분석, 공업 분석 및 발열량 분석을 수행한 결과를 종합하여 나타내었다. 원소 분석은 Leco 사의 CHN-2000 모델을 사용하여 이루어졌고, 발열량 분석은 일반적으로 사용되는 봄(bomb) 열량계를 사용하였다. 코크스에 고정탄소 성분이 더 많이 분포되어 있으며, 무연탄에는 휘발분이 더 많이 분포되어 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 무연탄의 회분 함유량이 코크스에 비해 높으며, 이로 인해 코크스의 발열량이 무연탄에 비해 약 300 kcal/kg 정도 높게 나타나고 있다.

열중량 분석은 10 mg 샘플에 대하여 이루어졌으며, 1000°C 까지는 분당 10°C 비율로 승온이

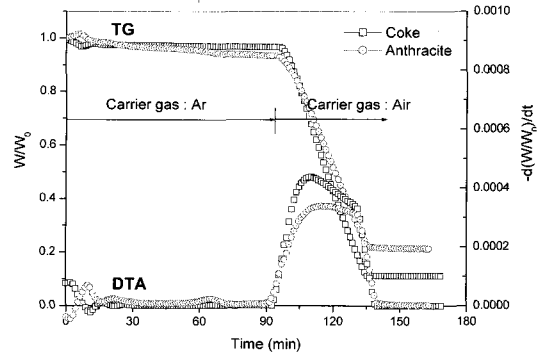
**Table 1. Results of elemental, proximate, and calorimetric analysis for coke and anthracite**

		Coke	Anthracite
Elemental Analysis (%)	C	87.86	86.04
	H	0.63	1.34
	O	9.42	11.85
	N	1.55	0.56
	S	0.54	0.21
Proximate analysis (% Dry base)	Volatile	2.26	4.99
	Fixed carbon	83.75	79.69
	Ash	13.99	15.34
Heating value (kcal/kg)		6294	5971

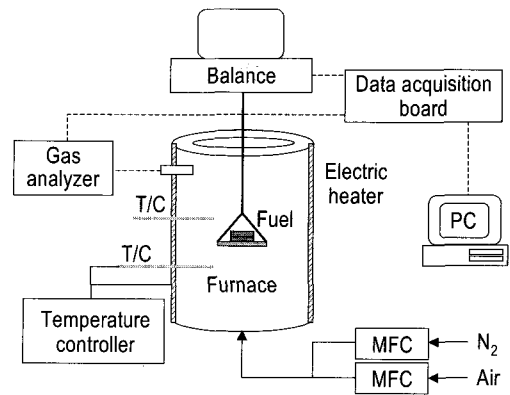
이루어졌고, 온도가 1000°C 에 도달한 뒤로는 일정 온도를 유지하도록 하였다. 온도 상승 구간은 불활성 기체(아르곤) 분위기로 설정하여 연소가 일어나지 않게 했으며, 1000°C 에 도달한 뒤에는 공기를 사용했다. Fig. 2 에는 코크스와 무연탄에 대한 열중량 분석 결과를 나타내었다. 결과는 시간에 따른 무게 변화를 나타내는 TG 선도와 이를 시간에 따라 미분한 DTA 선도로 나타내었다. 무연탄의 경우, 휘발분이 코크스에 비해 많이 함유되어 있으므로 무산소 분위기에서도 질량 감소가 일어나고 있음을 확인할 수 있으나 그 영향은 매우 미미하다. 또한 코크스의 질량 감소 비율이 무연탄에 비해 더 빠르게 나타나고 있는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이는 TG 선도에서도 나타나지만, DTA 선도에서 더욱 의미있게 나타나고 있다. 이를 통해 동일 조건에서 코크스의 반응성이 무연탄에 비해 더 높음을 확인할 수 있다.

10 mg 샘플의 열중량 분석 수행시의 연소 환경을 실제로 상황에 가깝게 수행하기 위하여 Fig. 3 과 같은 장치[6]를 사용하여 좀 더 많은 양의 연료에 대한 열중량 분석을 수행하였다. Table 2 에는 10 mg 샘플의 열중량 분석 수행 조건과 실험실 규모에서의 로내 열중량 분석 수행 조건을 비교하여 나타내었다. 승온 조건은 10 mg 샘플의 분석 수행시와 같게 하였으며, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO 가스 조성을 함께 측정하였다. 또한 입자 크기도 실제 조업에서 주로 사용하는 크기에 해당하는 1.5 - 3.0 mm 에 대해 분석을 수행하였다. 분위기 가스로는 무산소 분위기를 위해서는 질소를 사용하였고 10 L/min 유량을 설정했으나, 실제 무산소 분위기로의 설정이 일반적인 열중량 분석에 비해 매우 어렵다는 문제점이 있다.

Figure 4에는 분석을 수행한 결과를 나타내었다. 결과는 1000°C 온도 영역에서 일어나는 좌연소 구간만을 대상으로 나타내었으며, 여기에서 코크스의 연소속도가 무연탄에 비해 훨씬 빠르게



**Fig. 2. Results of thermogravimetric analysis for coke and anthracite**

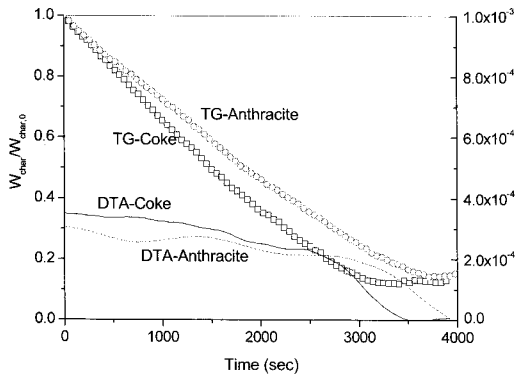


**Fig. 3. Schematic diagram of the experimental rig for thermogravimetric analysis of large amount of fuel**

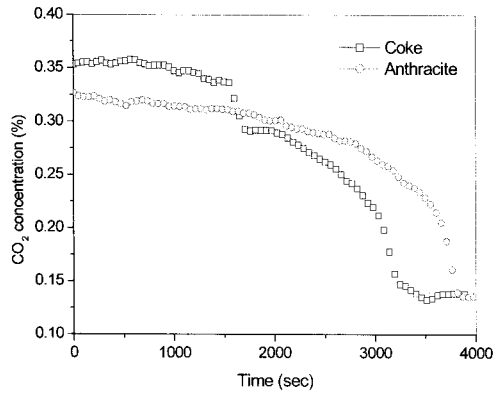
**Table 2. Conditions of thermogravimetric analysis**

		General TGA	TGA in lab-scale furnace
sample weight		10 mg	1 g
Carrier gas	Inert	Ar	N <sub>2</sub>
	in 1000°C	Air	Air
Flow rate of carrier gas		-	10 L/min
Heating rate		10 °C/min	10 °C/min
Measurement of gas composition		No	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO
Particle size		Not considered	1.5 ~ 3 mm

나타나고, 연소 종료 시점도 빠른 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 4(b)의 CO<sub>2</sub> 농도 결과에서도 비슷하게 나타나고 있다. 코크스를 연소시킨 경우에 CO<sub>2</sub>의 농도가 더 높게 나타나고 연소의 종료 시점은 더 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 연소 특성은 소결층 내



(a) TG-TDA diagram

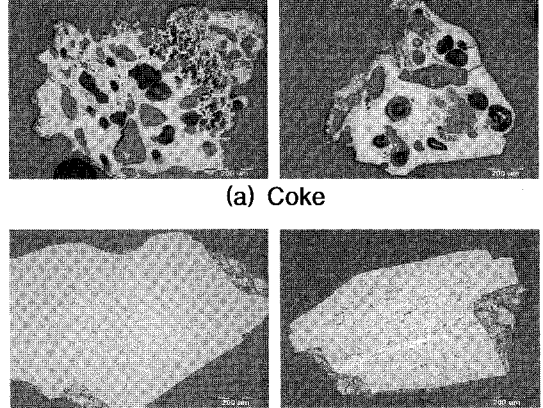


(b) Concentration of CO<sub>2</sub>

Fig. 4. Results of thermogravimetric analysis in the lab-scale combustor

에서의 연소 상황에도 그대로 반영된다.

Figure 5 에는 100 배 확대하여 찍은 코크스와 무연탄의 현미경 사진을 나타내었다. 좌측에 있는 것은 가열 전 실온에서 찍은 사진이며, 우측의 그림은 1000°C 까지 가열한 후에 찍은 사진이다. 코크스의 경우에는 원료탄이 휘발분을 많이 함유하고 있는 역청탄(bituminous coal)이기 때문에 coke oven에서 탈휘발이 일어난 후에 많은 내부기공이 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 무연탄의 경우에는 내부 기공이 거의 존재하지 않고, 휘발분이 많지 않기 때문에 1000°C 까지 가열한 후에도 내부 기공이 거의 생성되지 않는다. 이 사진을 통해 코크스와 무연탄의 연소 속도의 차이가 나타나는 원인을 규명할 수 있다. 우선, 내부 기공 생성으로 인해 코크스의 밀도가 무연탄에 비해 훨씬 낮게 되므로, 열용량이 감소



(b) Anthracite

Fig. 5. Photograph of the coke and fuel before/after heating to 1000°C

하고 연소열로 인한 온도 상승이 더 빠르게 일어나게 된다. 빠른 시간에 고온에 도달하므로 연소율이 더 빨라지게 됨을 유추할 수 있다. 또한, 내부 기공이 많은 코크스는 실제 같은 입도에서 내부 기공이 적은 무연탄에 비해 실효면적이 더 커지게 된다. 좌 연소는 surface reaction 이므로 표면적이 커질수록 연소율이 증가하게 된다. 이로 인해 코크스의 연소율이 무연탄에 비해 더 빠른 것을 확인할 수 있다. 이외에도 연료에 따라 고유한 반응성 (intrinsic reactivity) 차이가 존재하게 되는데[7], 수행한 분석 결과만으로 이 차이를 알아내기는 어려우며 이를 위해서는 좀더 세밀한 연료 특성 분석이 필요할 것으로 생각된다.

### 3. 소결층 내 연소 모델에의 적용

#### 3.1 모델 개요 및 계산 인자

소결층 내 연소 상황을 수치적으로 모사하기 위해 이전 연구[1]에서 새로 제시된 다중 고체상 모델을 사용하였다. Fig. 6 에는 사용된 모델의 개념도를 보여주고 있다. 지금까지 주로 사용되었던 모델은 고체 원료를 단일 상(phase)으로 고려하였으며[3-5], 이로 인해 다양한 고체 원료의 성상이 평균된 가상적인 입자로 반영되어 각 원료의 입자 크기나 고유한 물성이 반영되지 못하는 한계를 가지고 있었다. 그러나, 다중 고체상 모델에서는 고체 원료의 각 종류에 상을 부여하기 때문에 이러한 특성들의 반영이 가능하다. 이에 따라, 고체상들과 기체상 각각에 대해 지배방정식을 수립하여 모사를 수행하였다.

Table 2 에는 모델의 특성 및 반영한 주요 현상들을 정리하여 나타내었다. 모델은 1차원 비정

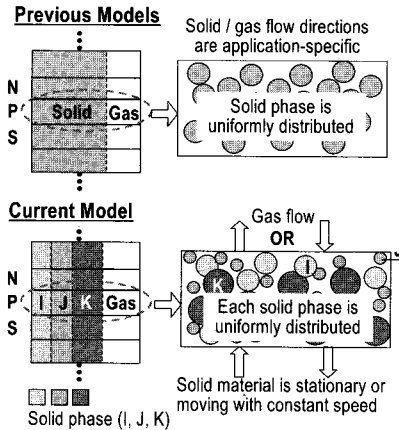


Fig. 6. Concept of the model with considerations of multiple solid phases

상 모델이며, 고체 원료는 철광석, 코크스(또는 무연탄), 석회석의 삼상으로 고려하였다. 기타 복잡한 반응, 열전달, 입자 크기 변화 및 층 높이 변화등이 고려되었으며, 각각의 식은 기존 연구에서 사용된 식들을 참조하였다[1,2].

반응에 있어서 연료 특성이 반영되는 가장 중요한 부분은 촉 반응으로, 이는 온도에 의존하는 kinetic rate 와 확산에 의한 물질전달에 의해 일어나는 연소율이 상호작용에 의해 일어나는 것으로 묘사되는[1,7] 다음 식을 이용하였다.

$$R_{c,i} = \frac{\sigma(\phi A_s)v_s W_{char} C_{g,i}}{1/(k_r \zeta) + 1/k_m + 1/k_{eff}}$$

위 식에서 코크스와 무연탄의 연료 특성 차이가 나타나게 되는 가장 중요한 부분은 아레니우스 반응식에 의해 온도에 의해 영향을 받게 되는 kinetic rate ( $k_r$ ) 과 내부 기공에 의해 실제 변하게 되는 단위 부피당 입자 표면적 ( $A_s$ ) 이다. 내부 기공이 많은 코크스의 경우에는 밀도가 무연탄 촉에 비해 작게 되며 이로 인해 온도의 상승 속도가 무연탄에 비해 빨라지고 반응률도 증가하는 것으로 보았다. 이에 대한 부분은  $k_r$  에 반영되었다. 또한, 코크스의 경우에는 실제 반응이 일어나는 표면적이 내부 기공 분포로 인해 무연탄보다 더 넓어지게 되며, 이는  $A_s$  에 반영되어야 한다. 표면적 변화를 반영하기 위해 열중량 분석에서 나타나는 반응률의 차이를 고려한 factor를 입자 크기에 의해 산술적으로 산출되는 표면적에 곱하여 연료 특성의 차이를 반영시켰다.

Table 3 에는 기본적인 계산 인자를 정리하여 나타내었다. 원료는 철광석이 대부분을 차지하는 가운데, 연료는 코크스가 3.7%를 차지하는 것으로 가정하였으며, 무연탄이 코크스 대신 사용되

Table 2. Outline of the combustion model in the sintering bed

General		1-D unsteady
Consideration of solid material		Homogeneous porous media Multiple solid phases
Governing equations		Mass, energy, and species conservation for each solid phase and gas phase
Sub-models	Heat transfer	Conduction/convection/radiation on heat exchange between solid phases
	Solid-gas reactions	Drying, Pyrolysis Char combustion/gasification
	Gaseous reactions	CO combustion H <sub>2</sub> combustion
	Geometrical changes	Particle shrinkage by reactions Generation of internal pores Bed height / Porosity changes

Table 3. Major input parameters of the calculation

Solid Phases				
Phase	Iron ore	Coke	Anthracite	Limestone
M <sub>i</sub> (%)	83.3	3.7	3.8	13.0
Moisture(%)	7.0	7.0	7.0	7.0
Initial internal pore	0.025	0.45	0.1	0.025
Particle diameter (mm)	3.2	2.0	2.0	1.6
Other input parameters				
Ignition	time	90		
	gas velocity	4 m/s		
	temperature	1400 K		
Cell #	57	Times step	1 sec	

는 경우에는 고정탄소량이 같도록 질량 분율을 설정하였다. 초기 내부 기공은 코크스와 무연탄의 겉보기 밀도(apparent density) 측정값을 근거로 하여 코크스의 경우 45 % 로, 무연탄의 경우에는 10 % 로 가정하여 차이를 주었다. 점화는 실험에서와 같이 90 초 동안 일어나는 것으로 설정되었으며, 1600 초에 해당되는 부분까지 계산을 수행하였다.

### 3.2 Sintering Pot Test

소결층에서의 연소 상황을 파악하기 위해서 sintering pot test 를 수행하였다. Fig. 7 에는 수행된 sintering pot test 장치의 개념도를 나타내었다. 실제 소결층은 길이 약 100 m 가량의

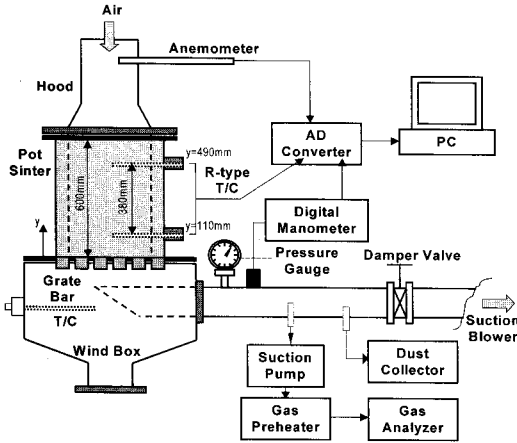


Fig. 7. Schematic diagram of sintering pot test

대형 장치이지만, 실험 장치에서 나타나는 시간에 따른 변화를 길이에 따른 변화로 변환할 수 있다. 소결층 부분은 높이 600 mm, 직경 205 mm 이며, 바닥에 통기성의 향상을 위해 직경 10 mm 이상의 hearth ore 가 30 mm 높이로 설치되어 있으므로 실제 소결층의 높이는 570 mm 가 된다. 상부와 하부에 R-type 열전대가 한 개씩 설치되어 소결층 내 온도 변화를 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 소결 배가스 조성 측정이 실시간으로 가능하며, 물질 정산을 확인하기 위해 공기 공급량과 배가스 유량의 측정을 수행하였다.

### 3.3 계산 및 실험 결과

Figure 8 에는 코크스를 사용한 경우에 대하여 계산한 결과를 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 계산 결과는 가장 중요한 부분인 온도에 있어서 잘 맞고 있는 것을 보여주고 있으며, 이는 연소대의 전파속도 역시 모델이 잘 예측하고 있음을 나타내는 것이다.

Figure 9 에는 모델을 통해 계산된 소결층 내 온도 분포 결과를 나타내었다. 코크스의 경우에 소결층 상부에서 고온 영역의 형성이 더 빠르게 시작되는 것을 볼 수 있으며, 이는 코크스의 반응성이 무연탄에 비해 높기 때문에 나타나는 결과이다. 이와 함께 연소대가 바닥에 도달하는 시간도 차이를 보이고 있는데, 높은 반응성을 가지고 있는 코크스의 경우에는 연소대가 소결층 바닥에 도달하는 시점이 약 1100 초 정도에서 형성되고 있는 반면에 무연탄의 경우에는 1200 초 가까운 곳에서 형성되고 있는 것을 볼 수가 있으며 연소의 종료 시점 역시 코크스가 더 빠르게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

위 결과를 정량화하여 나타내기 위해 연소대

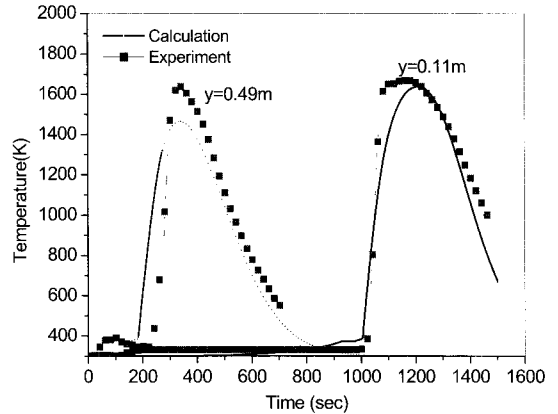


Fig. 8. Temperature profile - Experimental and calculation results

의 두께 (Combustion zone thickness) 와 층내 최고 온도 (Maximum temperature) 를 사용하였다. 위 두 인자는 계산 결과를 통해서 산출이 가능하다. 연소대의 두께는 계산시 최 연소가 개시되는 것으로 설정된 온도 1000 K 이상의 온도를 나타내는 셀의 개수로 정의되었으며, 층내 최고 온도는 연소시에 높이 방향을 따라 나타난 고체상의 평균 온도 중 최고값으로 정의하였다. 연소가 끝난 다음에 흡입 공기에 의해 냉각되는 동안에도 온도가 1000 K 를 넘을 수 있기 때문에 실제 최 연소가 일어나는 대역은 위 정의에 의한 두께값보다 좁아지게 된다.

Figure 10 에는 코크스와 무연탄에 대하여 위 두 인자를 산출하여 나타낸 값을 정리하여 나타내었다. 시간이 경과하면서 코크스 또는 무연탄 최의 연소율이 점점 증가하게 되고, 이에 따라 연소대의 두께가 점점 두꺼워지고 층내 최고 온도도 계속해서 상승하게 된다. 연소대가 바닥에 도달하면 연소대의 두께 및 층내 최고 온도가 떨어지게 되며, 연소가 끝나면 더 빠른 속도로 두 인자들의 값이 떨어진다. 코크스와 무연탄에 대해 비교해보면, 코크스를 사용할 때 최고 온도가 더 빠르게 상승하고 연소대의 두께도 더 빠르게 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 이는 코크스의 연소율이 같은 조건에서 무연탄 최에 비해 더 높게 나오는 현상을 반영하는 것이다. 또한 같은 고정 탄소 기준에서 코크스의 연소가 더 빨리 종료되는 현상도 잘 반영하고 있다. 최고 온도는 코크스를 사용할 경우가 무연탄을 사용할 경우에 비해 다소 높게 나오고 있으며, 최고 온도가 높고 연소가 빨리 종료되는 이러한 현상은 소결층의 품질 및 생산성에서 더 유리한 조건이 될 것으로 예측된다.

Figure 11 에는 위에서 기술한 현상들을 소결층 내 코크스와 무연탄의 질량 감소 변화를 통하

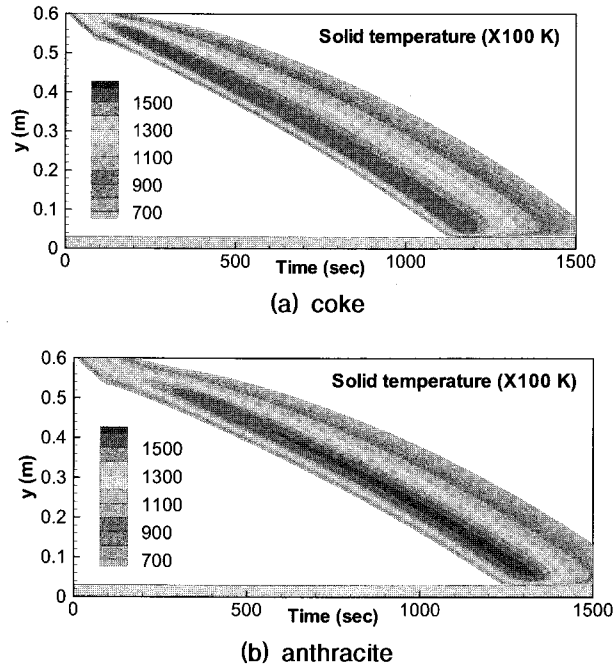


Fig. 9. Calculation results of temperature distributions in the sintering bed for using coke and anthracite

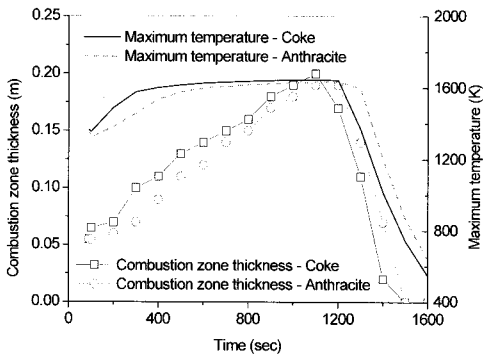


Fig. 10. Combustion zone thicknesses and maximum temperatures in the sintering bed for using coke and anthracite

여 나타내었다. 코크스의 질량 감소율이 무연탄에 비해 더 빠르게 나타나고 있으며 연소 종료 시점도 약 100 초 가량의 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 여기에서 코크스와 무연탄의 연료 특성 차이가 실제 소결층의 연소에 있어서도 중요한 인자가 될 수 있음을 확인할 수 있다.

Figure 12 에는 코크스를 연료로 사용한 경우와 무연탄을 연료로 사용한 경우에 대하여

sintering pot 실험 결과를 수행한 결과를 나타내었다. 실제 연소대의 두께를 확인하기 위하여 최종 연소 개시 온도로 설정된 1000K 이상에서의 소결층 상하부 각 지점의 연소 진행 시간과 최고 온도를 나타내었다. 코크스를 사용했을 때에 비해서 무연탄을 사용했을 때의 연소 진행 시간이 더 길게 나타나고 있는 현상을 볼 수 있다. 이러한 사실은 소결층 상부에서보다 하부에서 더 잘 보여지고 있는데, 이는 소결층 하부에서 생성된 적열대의 영향이 크기 때문으로 생각된다. 특히 무연탄의 연소 속도가 코크스에 비해 느리고 연소 시간은 더 길기 때문에 나타나는 특성 변화가 실험 결과에도 반영되고 있음을 확인할 수 있다. 최고 온도의 경우에도 무연탄을 사용했을 경우 코크스에 비해 더 높게 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 적열대의 영향으로 인해 소결층 하부에서 이러한 현상이 더 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 연소성의 차이는 실제 소결 공정의 생산성과 소결광의 품질에 영향을 끼치게 된다. 연소 시간이 길어지면서 소결에 걸리는 시간이 길어지기 때문에 생산성의 저하를 가져오게 되며, 연소대가 두꺼워짐으로써 통기성의 저하를 가져와 소결광의 품질에도 악영향을 끼칠 수 있다. 이러한 부분을 개선하기 위해서는 무연탄의 연소 속도를 코크스의 연소 속도와 비슷하게 제

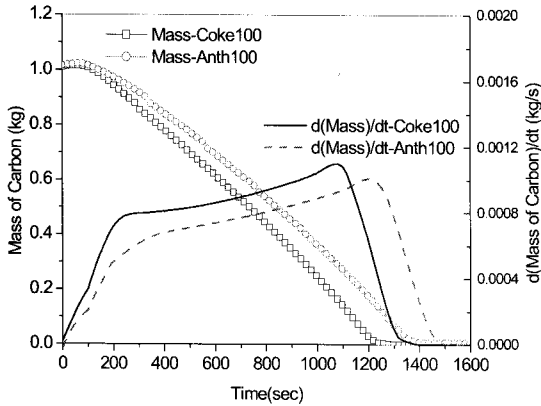


Fig. 11. Calculated mass reduction of coke and anthracite

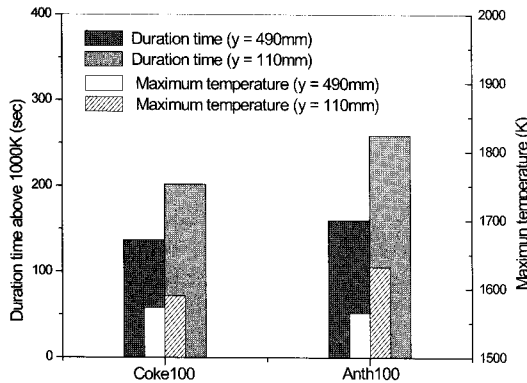


Fig. 12. Duration time above 1000K and maximum temperature for using coke and anthracite

어해줄 수 있는 운전 조건의 변화가 필요하다.

#### 4. 결론

코크스와 무연탄의 연료 특성 차이가 소결층에 미치는 영향을 파악하기 위해서 두 연료에 대한 기초 분석을 수행하고, 그 차이를 모델에 반영하여 계산을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 같은 조건에서 코크스가 무연탄에 비해 연소 속도가 더 빠르다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 코크스 입자 내 내부 기공이 더 많이 분포하여 연료 입자의 밀도가 낮고 surface reaction 인 촉 반응에 관계되는 입자 표면적이 크기 때문인 것으로 보인다.

2. 이러한 연소성(반응성)의 차이는 소결층 내 연소에서 그대로 반영되며, 소결층 내에서도 코크스의 연소 속도가 무연탄에 비해 더 빠르게

나타나는 계산 결과를 얻을 수 있었다.

3. 반응성이 좋은 코크스를 소결층에 사용하게 되면 소결층 상부의 온도 상승 속도가 빨라지고 전체적으로 연소대의 전파 속도가 무연탄을 사용할 때에 비해 더 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 연소대가 바닥에 도달하는 시간이 무연탄을 사용하는 경우가 코크스를 사용할 경우에 비해 약 100초 정도가 느리게 나타나며, 이는 소결 공정의 생산성을 악화시키는 직접적인 요인이 된다. 무연탄을 소결 연료로 사용할 때는 이러한 차이를 고려하여 최적 운전 조건 설정에 반영해야 할 것으로 보여진다.

#### 감사의 글

본 연구는 POSCO 기술 연구소와 과학기술부 국제 공동 연구의 지원을 받아 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

[1] W. Yang, C. Ryu, S. Choi, E. Choi, D. Lee and W. Huh, "Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid Phases", *ISIJ International*, Vol. 44, No. 3, 2004, pp. 492-499,

[2] 양원, 류창국, 최상민, "제철 소결기 베드 내 연소 및 열전달 모델링", *한국연소학회지*, vol. 7, 2002, pp.23-31.

[3] R. W. Young, "Dynamic Mathematical Model of Sintering Process", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 7, No. 6, 1977, pp. 321-328.

[4] M. J. Cumming, and J. A. Thurlby "Developments in Modelling and Simulation of Iron Ore Sintering", *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 17, 1990, pp. 245-254.

[5] M. V. Ramos, E. Kasai, J. Kano and T. Nakamura, "Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed", *ISIJ International*, Vol. 40, 2000, pp. 448-454

[6] 진홍중, 최상민, "고체 연료의 고온 공기 연소 특성에 관한 연구", *25회 KOSCO 추계 학술대회*, 2002

[7] A. Williams, M. Pourkashanian, J. M. Jones, "Combustion of Pulverized Coal and Biomass", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, 2001, pp. 587-610