

소결층 내 코크스/무연탄 연소 특성의 정량적 평가

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

A Quantitative Evaluation of Combustion Characteristics of Coke/Anthracite in an Iron Ore Sintering Bed

Won Yang*, Sangmin Choi***†

ABSTRACT

Combustion of coke/anthracite in an iron ore sintering bed is characterized quantitatively by introducing newly defined parameters related to propagation and thickness of combustion zone and maximum temperature. The parameters are obtained by sintering pot experiment and 1-D, unsteady numerical model which treats solid material as multiple solid phases. Experiments and calculations are performed for various major operating parameters: air inlet velocity, different type of fuels which have different reactivity and diameter of the solid fuel. Effects of the operating parameters on the productivity and quality of the sintering process are investigated and evaluated quantitatively and the results show that optimized air supply rate and diameter of anthracite for replacement of coke can be obtained. This approach can be applied to other kinds of combustors for characterization of the combustion in the solid fuel beds.

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

1. 서 론

제철소 내 소결 공정은 기본적으로 석탄 연료의 연소를 통해 철광석의 소결에 필요한 에너지를 공급하여 고로 운전에는 필요한 철광석의 크기 및 물성치를 얻어내는 공정이다. Fig. 1에서 나타난 것처럼 소결층 내에서는 고체 연료의 연소뿐만 아니라 연소대가 전파되는 과정 가운데 열/물질 전달 및 입자의 물리적 크기 변형 등의 다양하고 복잡한 현상이 일어나게 된다. 이중 가장 중요한 것은 역시 코크스 또는 무연탄 형태로 존재하는 석탄의 연소 특성으로, 이는 공정의 생산성 및 소결광의 품질을 좌우하는 가장 중요한 인자이다. 연소 특성이 전체 공정에 미치는 영향을 파악하고 공정의 효율을 평가하기 위해서는 소결층 내 코크스 또는 무연탄의 연소 특성을 정량화하고 평가하는 작업이 매우 중요하다고 할 수 있다. 소결층과 유사한 형태를 가지는 연소로 내 고체 연료층의 연소 특성을 정량화하기 위해 기존 연

구자들이 도입한 가장 중요한 인자로는 연료층 내 연소대 전파 속도 (Flame front speed)를 들 수 있다[1]. 이 인자는 연료층 내 특정한 두 지점의 거리를 연소대가 한 지점에서 나머지 한 다른 지점으로 이동하는데까지 걸리는 시간으로 나눈 것이다. Shin and Choi[1]는 정육면체 형태의 나무를 연소하는 실험실 규모의 packed bed 형태의 연소로에서 공기 공급량과 입자 크기를 바꾸어가면서 실험을 수행했으며, 각 실험 케이스에 대하여 연소대 전파 속도를 산출하여 각 운전인자들이 연소대 전파에 미치는 영향을 해석하였다. 소결층 내에서의 연소대 전파는 연소대 전파 속도보다는 소결 시간(sintering time)의 형태로 더 많이 표시된다. 소결 시간은 물리적으로 연소가 시작되어 끝날 때까지 걸리는 시간을 의미하며, 이는 연소대 전파 속도와 정확하게 반대의 경향을 가지게 된다. 즉, 연소대 전파 속도가 빠르면 소결 시간은 짧아지고, 연소대 전파 속도가 느리면 소결 시간은 길어지게 되는 것이다. 이는 소결 공정의 생산성과 밀접한 관계가 있기 때문에 기존의 소결 공정 관련 연구들에서는 소결 시간을 사용한 해석 결과들이 많이 보고되고 있다. 그러나, 소결 공정의 효율을 결정하는 연소 특성

* 한국과학기술원 기계기술연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

*** POSCO 기술연구소 제련 연구 그룹

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

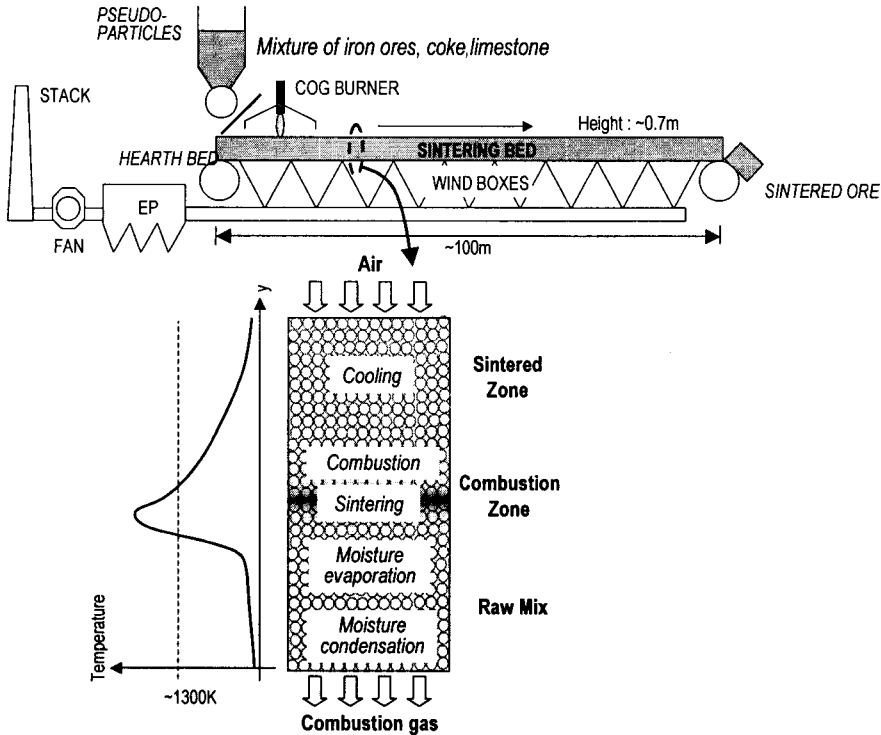


Fig. 1. Schematic diagram of sintering process in the iron-making process

은 단순히 연소대의 전파 속도로만 평가하는 것은 매우 부족하다고 할 수 있다. 소결광의 품질을 결정하는데 있어서는 소결층 내 온도의 절대값이 매우 중요한 역할을 하게 된다. 높은 온도가 확보될수록 철광석의 용융이 원활해져 소결광 품질의 향상을 도모할 수 있다. 이와 함께 연소대의 두께가 적절하게 형성되어야 에너지의 집중이 이루어지면서 통기성이 악화되는 상황을 막을 수 있다. 이러한 측면에서 정량화 인자를 사용하여 소결층 내 연료의 연소 특성을 평가할 수 있는 방법이 새롭게 요구된다.

이에 따라 본 연구에서는 소결층 내 코크스 또는 무연탄의 연소 특성을 정량적으로 해석하기 위한 다양한 인자들을 도입하여 해석을 수행하였다. 기존에 수립된 소결층 1차원 비정상 모델링 및 축소 규모 모형에서의 실험 결과를 사용하여 여러 운전 인자들이 소결층에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 연소 특성의 정량화 인자들

소결 공정의 효율을 결정하는 중요한 연소 특성은 전술한 바와 같이 연소대의 전파 속도와 연소대 내부의 특성으로 크게 나눌 수 있다. 이들을

정량화하여 해석하기 위해 Table 1에 정리되어 있는 인자들을 도입하였다.

우선, 연소대의 전파 속도에 관련된 인자로서 기존에 사용되어왔던 Flame front speed (FFS)와 Sintering time (ST)를 도입하였다. Flame front speed는 소결층 내 수직 방향으로의 두 지점을 사이를 연소대의 앞면 (combustion front)이 지나가는 속력으로 정의되며, 이 값이 클수록 연소대의 전파가 빠르게 진행됨을 의미한다. Sintering time은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 점화가 시작된 후부터 소결층 하부의 가스 온도가 최대가 되는 지점까지의 시간을 의미한다. 이는 실제 현장에서 많이 사용되며, 전술한 것처럼 FFS에 반비례하게 된다. 소결 공정의 생산성은 연소대의 전파속도가 빠를수록, 즉 FFS 값이 크고 sintering time이 작을수록 더 좋게 된다.

소결 공정의 생산성과 함께 중요한 것은 소결광의 품질인데, 이를 결정하는 가장 중요한 요소는 연소대 자체의 특성이다. 이에 따라 연소대 자체의 특성을 정의하기 위해 Fig. 3과 같이 Duration time in combustion zone (DTCZ)와 Combustion zone thickness (CZT)를 새롭게 정의하였다. CZT 값이 클수록 연소대가 두꺼워지고 DTCZ 값도 커지게 되는데, 적절한 값이 유지되어야 한다. 이 값들이 지나치게 커지면 용융

대의 두께가 두꺼워지면서 통기성에 문제가 발생하게 되고, 너무 작으면 소결에 필요한 충분한 에너지가 공급되지 못할 우려가 생기게 된다. 또한, 연소대의 두께뿐만 아니라 연소대에서의 최고 온도가 높을수록 소결에 필요한 충분한 에너지가 공급되므로 이 역시 소결광의 품질을 결정하는데 있어서 매우 중요하다. 본 연구에서는 이를 고려하여 Maximum temperature (MaxT) 라는 인자를 도입하였다. 이는 각 시간마다 소결층 내에서 나타나는 최고 온도값으로 정의되며, 온도가 높을수록 소결층의 특정부분에 더 많은 에너지가 가해짐을 의미한다.

이렇게 정의된 인자들 중 FFS, ST, DTCZ 는 실험을 통해 파악이 가능한 인자들이지만, 나머지 인자들은 계산을 통해서만 파악이 가능하다. 즉, 연소대의 전파 속도에 대해서는 실험적인 방법으로 파악이 가능하지만, 연소대의 특성을 파악하기 위해서는 실험적인 방법만으로는 부족하며 수치해석을 통한 보완이 이루어져야 한다.

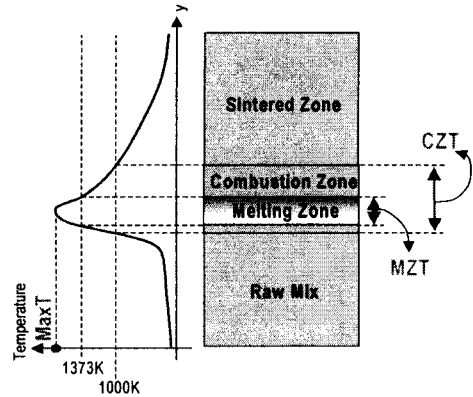


Fig. 3. Definition of the parameters for characterization of solid bed combustion

3. 실험 및 수치 해석

3.1 축소 규모 소결 포트 실험

실제 소결층은 높이는 약 0.6 m, 폭은 약 5 m 에 불과하지만, 길이가 100 m 가 넘는 대형설비이다. 폭 방향으로의 전달 현상을 생각하지 않는다면 소결 공정은 높이 방향과 길이 방향을 고려한 2차원으로 모사되어야 한다. 그러나 실제 공정에서 가스의 흐름은 거의 높이 방향으로 이루어지므로, 길이 방향의 열 및 물질 전달 현상은 높이 방향에 비해 매우 적다고 가정하면 중요한 현상은 높이 방향으로만 단순화될 수 있다. 또한 소결층의 이송 속도는 공정 중에 변하지 않기 때문에 시간에 따른 높이 방향의 변화만을 고려하면 Fig. 4 와 같은 축소 규모 소결 포트 실험을 통해 전체 공정을 모사할 수 있게 된다.

본 연구에서 사용된 소결 포트는 기본적으로 시간에 따른 높이 방향의 현상을 고려할 수 있게 되어 있으며, 소결층 내 온도를 측정하기 위해 세 지점에 R type 열전대를 설치했다. 또한 배가스의 온도를 측정하기 위해 wind box 에 K type 열전대를 설치하였다. 열전대를 설치한 위치가 소결층과 약간 떨어져 있기 때문에 배가스의 절대 온도값은 의미가 없고 온도의 변화 trend 만 소결 시간(sintering time) 측면에서 의미가 있게 된다. COG (coke oven gas) 버너를 사용하여 점화를 수행하는 실제 공정을 모사하기 위해 LPG 버너를 사용하였고, 배가스의 조성 및 압력 차이를 측정할 수 있게 하였다. 통기성 확보를 위해 실제 공정에서와 같이 20 mm 가량의 소결광 층을 설치하였다.

Parameters	Definition	Obtained by
Flame front speed (FFS)	Distance between two points Time consumed for propagation	Measurement/ Computation
Sintering time (ST)	Elapsed time until the flue gas temperature indicates maximum	Measurement/ Computation
Duration time in combustion zone (DTCZ)	Retention time above the initiation temperature of char combustion	Measurement/ Computation
Combustion zone thickness (CZT)	Thickness of the zone whose solid temperature is over the initiation of char combustion	Computation
Melting zone thickness (MZT)	Thickness of the zone of which solid temperature is over the initiation of iron ore melting	Computation
Maximum temperature (MaxT)	Maximum temperature of the solid material at the given time	Computation

Table 1. Definition of the parameters for characterization of bed combustion

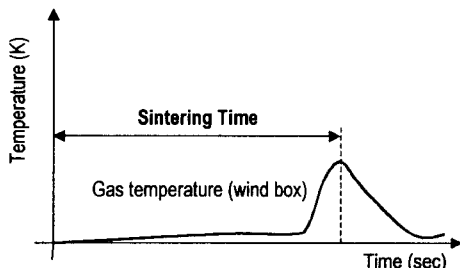


Fig. 2. Definition of sintering time

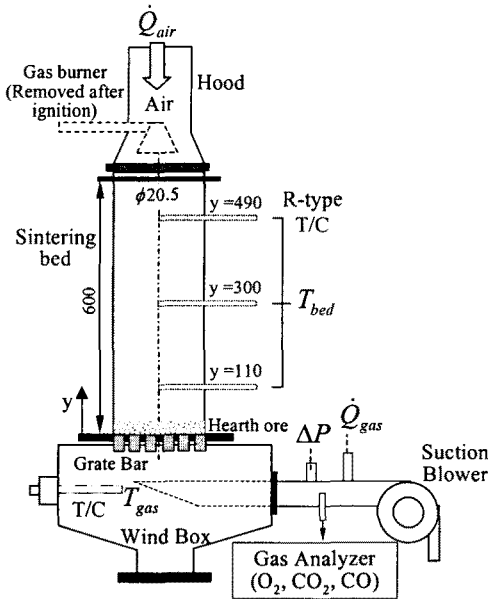


Fig. 4. Sintering pot test rig

3.2 수치해석적 접근

소결층 내 연소 상황을 수치적으로 모사하기 위해 다중 고체상 모델을 사용하였다[1]. Fig. 5 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 비정상 모델이며, 고체 원료는 철광석, 코크스(또는 무연탄), 석회석의 삼상으로 고려하였다. 기타 복잡한 반응, 열전달, 입자 크기 변화 및 층 높이 변화 등이 고려되었으며, 각각의 식은 기존 연구에서 사용된 식들을 참조하였다[1,2].

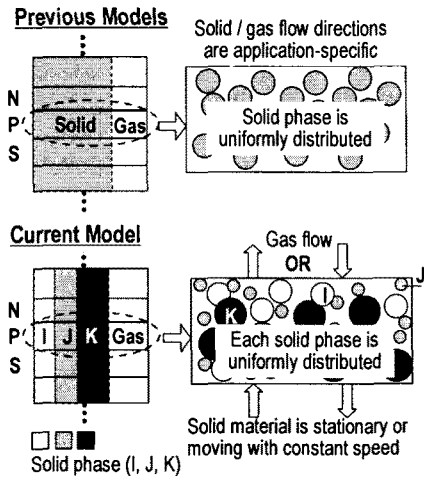


Fig. 5. Concept of the model with considerations of multiple solid phases

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 heat exchange between solid phases
	Solid-gas reactions	Drying, Pyrolysis Char combustion/gasification
	Gaseous reactions	CO combustion H ₂ combustion
	Geometrical changes	Particle shrinkage by reactions Generation of internal pores Bed height / Porosity changes

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

3.3 케이스 설정

실험 및 계산은 소결 공정에서 가장 중요한 운전 인자에 해당하는 공기 공급량, 연료의 입도, 그리고 고 연료의 연소 특성 차이에 의한 효과를 파악하기 위해 수행되었다. Table 3 에는 기본 케이스에 해당하는 주요 운전 인자 및 계산에 사용된 인자들을 나타내었다. 90초 동안 LPG 가스 버너에 의해 소결층 위쪽이 가열되면서 점화가 일어나고, 이후 약 1600 초 동안 공정이 진행된다. 장입물은 대부분 철광석이 차지하고 있으며 석회석과 연료가 들어간다. 연료로는 코크스를 사용하거나 무연탄을 사용하는 경우를 고려하였으며, 이 두 연료는 초기 내부 기공에서 많은 차이를 보이게 된다. 초기 내부 기공의 차이는 표면적으로 다르게 하여 반응 속도의 차이로 나타나게 된다.

기본 공기 공급량은 압력강하 1500 mmH₂O 에 해당되는 공기량으로 설정하였다. 이를 기준 케이스로 하여 공기 공급량, 연료의 입도를 바꾸어 가면서 실험 및 계산을 수행하였다. 그리고 연료의 연소 특성 차이를 정량적으로 파악하기 위해 코크스와 무연탄을 사용했을 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 자세한 사항은 Table 4 에 정리하여 나타내었다.

Solid Phases				
Phase	Iron ore	Coke	Anthracite	Limestone
M _i (%)	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	Time step	1 sec	

Table 3. Major input parameters of the calculation

Case name	Solid fuel	Averaged air velocity (m/s)	Particle diameter (mm)
Air0.26	Coke	0.26	2.0
Air0.32	Coke	0.32	2.0
Air0.52	Coke	0.52	2.0
Coke100 (Ref.) = Air0.45	Coke	0.45	2.0
Anth100	Anthracite	0.45	2.0
Anth1.2	Anthracite	0.45	1.2
Anth1.4	Anthracite	0.45	1.4
Anth1.6	Anthracite	0.45	1.6
Anth1.8	Anthracite </td <td>0.45</td> <td>1.8</td>	0.45	1.8

Table 4. Experimental and calculation cases

4. 계산 및 해석 결과

4.1 공기 공급량에 의한 영향

공기 공급량이 많아지면 연소 속도가 빨라지게 된다. 이는 소결 공정 내에서는 아래쪽에서의 연소대 전파 속도가 빨라지는 것으로 나타나게 된다. Fig. 6 에는 소결층의 상부 (y=490mm) 와 하부 (y=110mm)에서 시간에 따라 측정된 온도 profile을 나타내었다. 공기 공급량이 많아질수록 온도 상승 시점이 더 빠른 것을 알 수 있다. 이는 연소대의 전파 속도가 공기 공급량이 많아질수록 더 빠르게 나타나고 있음을 의미한다. 이러

한 현상은 소결층 상부에서보다 하부에서 더욱 분명하게 나타나고 있다.

이러한 현상을 정량적으로 나타내기 위하여 연소대 전파 속도 (FFS; Flame Front Speed) 와 소결 시간(ST; Sintering Time) 의 측정값과 계산값을 Fig. 7 에 나타내었다. 이를 통해 연소대의 전파 속도를 정량화하여 표현할 수 있으며, 공기 주입 속도, 즉 공기 공급량이 많을수록 FFS 값이 커지고 소결 시간은 짧아지는 것을 알 수 있다. 이는 공기 공급을 많이 할수록 소결 공정의 생산성이 높아짐을 의미한다. 그러나 공기 공급량을 필요 이상으로 많게 설정하면 후처리 장치의 성능에 영향을 끼치게 되고, 경제성 측면에서 문제가 발생하게 된다. 또한 필요 이상의 공기 공급은 연소대를 냉각시켜 소결광의 품질에 영향을 줄 수 있으므로 주의깊은 설정이 필요하다. Fig. 8 에는 공기 공급량의 변화에 따른 1000 K 이상에서의 duration time (DTCZ) 값과 MaxT 값을 나타내었다. 공기 공급량이 많아질수록 DTCZ 값이 줄어들고 있는 결과를 보여주고 있는데, 이는 철광석이 연소대를 거치는 시간이 적음을 의미하며, 에너지 효율 측면에서 바람직하지 못한 결과를 초래할 수 있는 부분이다. 또한 MaxT 값 역시 공기 공급량이 많을수록 떨어지고 있는 결과가 나타나고 있는데, 이 역시 소결광의 품질 측면에서 악영향을 끼칠 수 있는 부분으로 많은 주의가 필요하다.

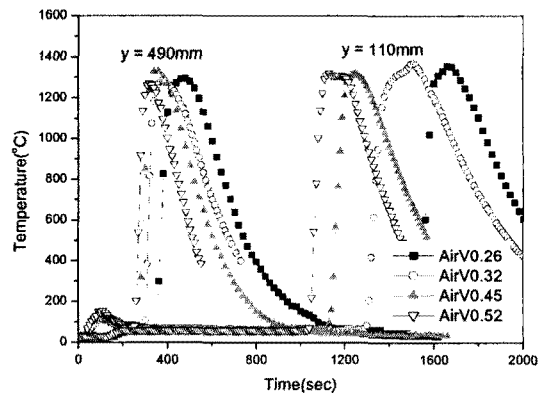


Fig. 6. Test results of temperature profiles and gas compositions for various air velocities

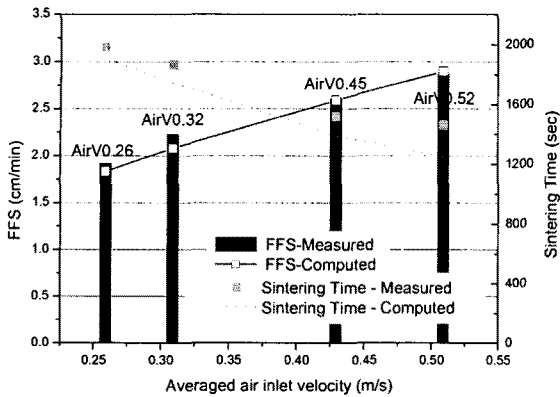


Fig. 7. FFS and sintering time for various air velocities - experimental and computed results

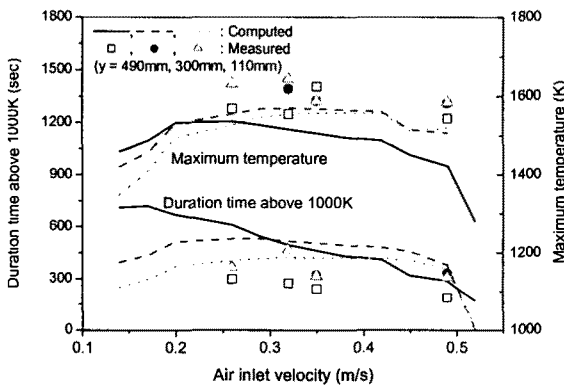


Fig. 8. Duration times above 1000 K and maximum temperature for various air velocities

4.2 연료 특성의 차이에 의한 영향

고가의 코크스 대신 저가의 무연탄을 소결 연료로 사용하고자 하는 시도가 최근 들어 수행되고 있다. 무연탄의 경우 코크스에 비해 내부 기공이 작고 열용량이 커서 연소가 더 느린 대신 오래 진행되는 것으로 알려져 있다. 연소 특성이 다른 두 연료를 사용했을 때 나타나는 가장 큰 차이점은 소결층 상부에서의 온도 변화와 연소대의 진행 속도, 소결층 하부에서의 연소대의 두께이다. Fig. 9 에는 연료로 코크스를 사용할 때와 무연탄을 사용할 때 나타나는 온도 profile 및 MaxT의 차이를 계산한 결과를 나타내었다. 우선, 무연탄을 사용했을 때는 코크스를 사용했을 때에 비해 소결층 상부에서의 온도가 더 느리게 상승하는 것을 볼 수가 있다. 이는 무연탄의 열용량(heat capacity)이 코크스에 비해 더 높아서 착화 온도에 이르는 승온 속도가 느리고, 연소가 시작

되는 온도대에서부터는 반응성이 코크스에 비해 더 낮아 연소율이 코크스를 사용할 때에 비해 더 낮기 때문이다. 이러한 특성 변화는 연소대의 진행 속도가 더 느리게 나타나는 것과 소결층 하부에서 고온 영역이 더 두껍게 형성되는 것에서도 확인할 수 있다. 코크스의 연소율이 무연탄에 비해 훨씬 더 크게 나타나고 있는 반면에, 연소가 진행되는 시간은 무연탄이 더 길게 나타나고 있으며 이는 이전 연구에서 수행되었던 연료 특성 분석에서 나타나는 결과와도 일치하는 부분이다. 또한 동일 위치에서 코크스의 연소가 무연탄에 비해 훨씬 더 빨리 개시된다. 이 역시 코크스의 반응성이 무연탄에 비해 더 좋기 때문에 생기는 현상이다. 연소대의 전파 속도가 무연탄을 사용할 때에 비해 더 빠르다는 것을 의미하고, 그 결과 소결 시간 단축이 이루어져 생산성 측면에서 더 유리한 결과를 나타내게 된다(Fig. 10). 연소성의 차이는 층 상부 (y=490mm) 에서의 온도 profile 에서보다 층 하부 (y=110mm) 에서의 온도 profile 에 더 많이 반영되고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 11 에서 나타나고 있는 바와 같이 무연탄의 경우 고온에서의 체류시간이 코크스를 사용할 때 비해 다소 길게 나타나고 있으며 이 역시 분코크스에 비해 더 느리고 길게 연소하는 무연탄의 연소성이 반영된 결과이다.

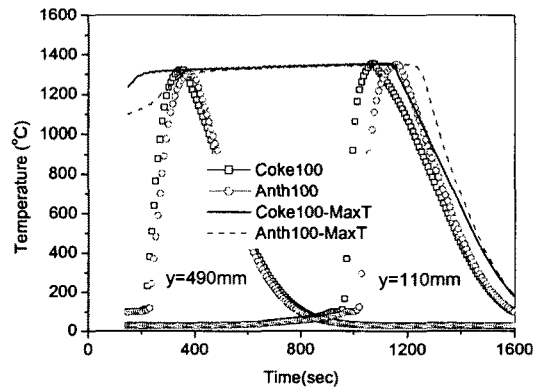


Fig. 9. Solid temperature profiles from pot test and maximum temperatures from calculation for coke and anthracite

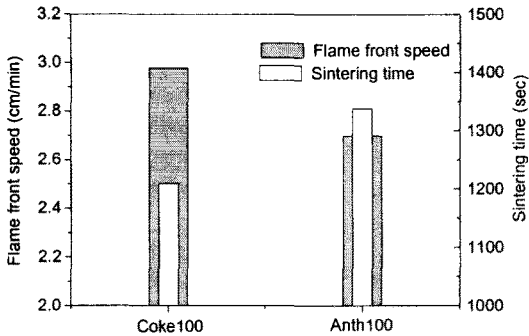


Fig. 10. FFS and Sintering time for Coke100 and Anth100

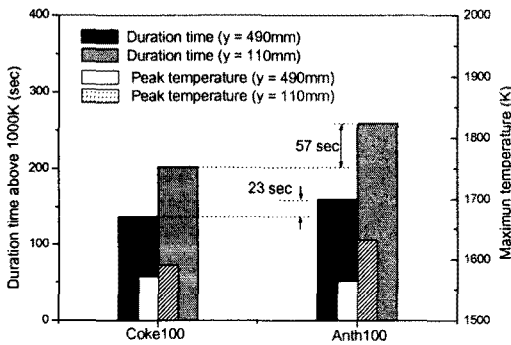


Fig. 11. DTCZ and peak temperature for Coke100 and Anth100 (Experimental result)

4.3 연료의 입도에 의한 영향

연료의 입도가 작아지면 연소를 할 수 있는 표면적이 더 넓어지므로 연소율이 더 커지게 된다. 이는 연료의 입도가 작을 때에 연소율이 더 커지게 되고 연소대의 전파 속도가 이에 따라 더 빨라지는 것을 의미한다.

Fig. 12 에는 연소대 전파속도를 의미하는 FFS 값과 소결 시간값을 다양한 무연탄 입도에 따라 나타내었다. 무연탄의 입도가 커질수록 연소대의 전파 속도가 느려지고 이에 따라 소결 시간이 감소하는 경향을 잘 보여주고 있다. 또한, 무연탄 입도가 1.4 mm 일때 FFS 값은 2.97 cm/min 로, Coke100 에서 나오는 FFS 값 2.98 cm/min 와 거의 비슷하게 나타나고 있다. 여기에서, 본 모델에서 2.0 mm 입도의 분코크스의 연소성에 가장 가까운 무연탄의 입도는 1.4 mm 근처에 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

Fig. 13 에는 여러 입도의 무연탄에 대하여 계산된 결과를 바탕으로 하여 연소대의 두께(CZT), 용융대의 두께(MZT) 및 최고 온도(MaxT) 를

나타내었다. 여기에서도 시간이 지날수록 CZT 와 MZT 값이 증가하다가 연소가 종료되면 온도가 내려가면서 이 값들이 0으로 떨어지게 된다. 무연탄의 입도가 클수록 연소에 많은 시간이 걸리게 되어 MZT 와 CZT 값이 더 느리게 0으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 특기할만한 사실은 계산 조건 하에서 무연탄의 입도가 작을수록 CZT 값은 커지는 반면에 MZT 값은 큰 차이는 아니지만 더 작아지고 있다는 것이다. 이는 무연탄의 입도가 작을 때에는 연소대의 두께는 더 두꺼워지지만 실제 용융이 일어나는 지점의 두께는 더 얇을수도 있음을 의미한다. 또한 층 상부에서 연소가 진행되는 100~400 초 사이에서 최고 온도 차이가 무연탄의 입도에 따라 매우 크게 나타나고 있으며, 이는 무연탄의 입도가 작을 때 반응성이 증가하여 연료가 더 적극적으로 공기와 반응함을 의미한다. 여기에서 무연탄의 입도를 조절함으로써 코크스와 무연탄의 연소 특성 차이를 보완할 수 있음을 확인할 수 있다.

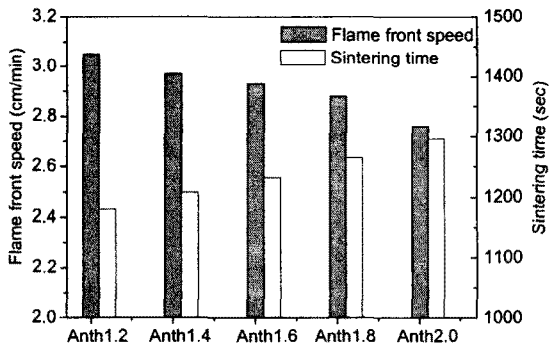


Fig. 12. FFS and sintering time for various particle sizes of the anthracite

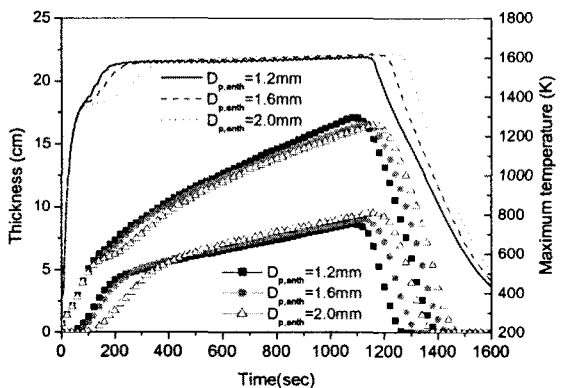


Fig. 13. CZT, MZT and Maximum temperature for various diameters of anthracite

5. 결 론

철광석 소결층에서 나타나는 연료의 연소 특성을 정량적으로 평가하기 위한 인자들을 새로 정의하여 도입하였다. 고체 연료층 내 연소대의 특성은 연소대의 전파 속도와 연소대 자체의 두께 및 최고 온도로 나누어 확인할 수 있다. 연소대의 전파속도 측면에서 화염면 전파 속도 (Flame front speed) 와 소결 시간 (sintering time)을 정의하였고, 연소대의 두께를 정의하기 위해 연소대 두께(combustion zone thickness), 용융대의 두께(melting zone thickness) 및 연소대에서의 고체 원료 체류시간 (Duration time in the combustion zone) 을 정의하였다. 소결층 내 주요 운전 조건의 변화에 대해 정의된 인자들을 실험 및 수치해석을 통하여 산출해내었으며, 이를 통해서 소결 공정에서의 생산성 및 에너지 효율 측면에서의 평가가 가능하게 되었다. 이러한 접근 방법은 유사한 형태의 다른 고체 연료층의 연소 특성 평가에도 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] D. H. Shin, and S. Choi "The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed", *Combust. and Flame*, Vol. 121, 2000, pp. 167-180.
- [2] 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,
- [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] 양원, 양광혁, 최상민, 최응수, 이덕원, 김성만, "소결층 내에서의 코크스와 무연탄의 연소 특성 비교 연구", 25회 KOSCO 춘계 학술대회, 2004, pp.141-148