

소결 베드 연소 수치해석의 확장 - 가스 연료 주입 및

배가스 재순환 공정 적용

이영현* · 양원** · 조병국*** · 최상민*†

Numerical Analysis of Sintering Bed Combustion; Applying Supplying Gaseous Fuel and Flue Gas Recirculation Processes

Younghun Lee*, Won Yang**, Byungkook Cho***, Sangmin Choi*†

ABSTRACT

In the iron ore sinter process, temperature distribution pattern in sintering bed is related with productivity and quality of sintered ore. Evenly heat distribution make the uniform quality of sintered ore but in normal operating condition, upper part of bed has lack of heat and scarce quality of sintered ore, thus yeild rate is decreased and productivity is diminished. Therefore, using the additional fuel for increasing quality and flue gas recirculation for increasing productivity are considered and effect of both processes are discussed.

Key Words : Solid Fuel bed, Sintering process, Gaseous fuel, Flue gas

철을 만드는 과정에서 선철의 원료가 되는 철광석의 제조에 소결공정이 사용된다. 제철 공정에 사용되는 원료는 균일한 품질을 지니고 저렴한 분말 형태의 철광석분을 사용한다. 이러한 철광석분은 직접 고로에 장입할 수 없기 때문에 일정 이상의 크기와 강도를 가지는 괴성광으로 만드는 과정이 소결공정이다. 철광석 입자의 크기를 키우기 위해서는 입자 표면이 용융되어 입자간의 결합이 일어나 치밀화 되는 과정이 필요하다. 이를 위한 열원으로 고체 연료인 코크스가 사용되고, 미세한 분말이 그대로 소결공정에 사용될 경우 공정에 필요한 공기가 제대로 공급되지 않으므로 비교적 균일한 입자 크기를 가지는 의사입자를 만드는 과정이 선행된다. 의사입자를 만드는 과정은 원료에 물을 첨가하여 큰 입자 표면의 요철에 미세한 입자가 달라붙게 하고 압축하여 생성한다. 의사입자의 크기는 약 3mm크기로 소결 공정에 베드형태로 장입된다.

Fig. 1은 일반적인 제철 공장에서 사용되는 소결 공정을 나타낸 그림이다. 위쪽에는 의사입자를 형성하는 과정을 도시하였다. 소결 공정에 사용되는 원료의 80%는 철광석으로 열원으로 사용되는 코크스 5%와 석회석 등을 드럼에서 물과

함께 섞어줌으로써 의사입자를 형성하게 된다. 형성된 입자는 순환식 화격자에 장입되어 약 60 cm 높이로 층을 형성하고 레일을 따라 이동하게 된다. 직화식 버너에 의해 베드의 표면에서 코크스가 착화되고 베드의 하부로 화염이 이동하게 된다. 코크스 연소의 산화제로는 공기를 사용하고 베드의 상부에서 하부로 흐른다. 이를 위해 베드 하단에는 윈드박스를 설치하고 흡인 팬을 이용해 베드에 공기를 공급한다. 그림에서 음영으로 표시된 부분은 베드에서 코크스 연소가 이루어지는 구간으로 고온의 온도 분포를 보인다. 이러한 온도 분포의 특징은 하부에 고온의 열이 집중되는 점이라 할 수 있다. 베드의 통기성은 연소가 하부로 진행될수록 소결이 완료된 층이

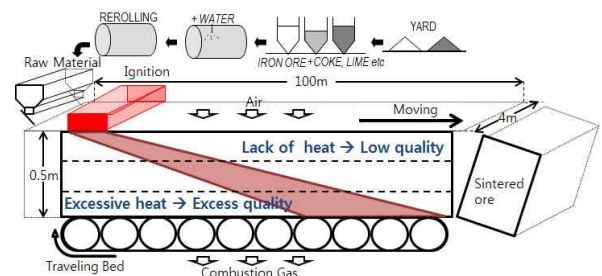


Fig. 1 Schematic diagram of sintering process in the steel industry

늘어나기 때문에 하류에서 베드내 기공이 증가하

* 한국과학기술원 기계공학과
 ** 한국생산기술연구원
 *** POSCO 기술연구원
 † 연락처, smchoi@kaist.ac.kr
 TEL : (042)350-3030

여 유속이 빨라지 된다. 베드의 하류에서는 상류에서보다 주입되는 공기의 양이 증가하고 코크스의 연소속도도 빨라지게 된다. 따라서 연소열이 집중된 베드의 하부에서 입자 크기가 큰 소결광이 생산되고 상부에서는 작은 크기의 소결광이 생산된다. 생성된 소결광은 파쇄 및 크기 선별 과정을 통해 5~75mm의 분포를 가진 입자가 고로에 투입되고 이보다 작은 입자는 소결 공정으로 재순환된다.[1]

소결 공정에서 베드내 온도 분포를 통해 소결광의 품질과 생산성을 예측할 수 있기 때문에 소결 베드의 온도를 예측하는 것은 새로운 소결 공정을 평가 하는데 중요한 역할을 하게 된다. 이에 소결 베드에서 일어나는 현상을 Fig. 2와 같이 단순화 하여 모델에 적용하였다. 소결 베드를 1차원의 비정상상태로 단순화하였다. 베드의 길이축은 일정한 속도로 이동하므로 시간축으로 대체하였고, 베드를 통과하는 유속은 플러그 플로우로 가정하여 베드의 높이 방향에서의 열전달과 물질 전달을 고려하였다. 베드의 고체층은 3가지 물질로 이루어진 것으로 가정하여 각 입자간의 열전달을 고려하였고, 기체와 고체의 연소반응을 포함하여 물질 전달 및 열전달을 계산하였다. 모델에 사용되어진 지배방정식과 서브모델은 Table 1에 정리 하였다.[3]

소결 공정의 열원인 코크스의 연소의 제어를 통하여 소결 공정의 효율을 높이기 위한 여러 가지 방안이 연구되어 왔다. 배가스 재순환 소결 공정은 공기만을 사용하는 일반적인 공정과 비교하여 배가스의 낮은 산소 농도 함량에 의해 배가스가 주입되는 구간에서는 연소에 부정적인 영향을 끼치게 된다. 하지만 배가스를 재순환하기 때문에 배출되는 전체 배가스양을 줄일 수 있고[4], 기존 설비에 배가스 재순환을 위한 팬이 추가되기 때문에 베드 상단에서 흡인되는 전체 풍량이 증가하게 되어 생산성이 증가하는 특징을 갖고 있다. 가스 연료 주입 소결 공정은 상하부에 걸쳐 불균일하게 분포되는 연소열을 균일하게 하기 위하여 사용된다. 고체 연료인 코크스는 소결 공정의 특성상 하부에 연소열이 집중되게 된다. 상부에 부족한 열을 효과적으로 보충하기 위해서

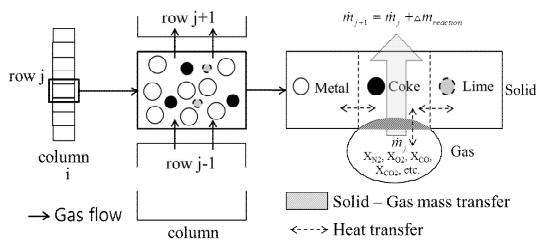


Fig. 2 Combustion environment of sinter bed in the model

Table 1 Major parameters of the calculation

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

상부에 침투하여 연소가 가능한 가스연료의 주입이 고려되었다.[5]

두 가지 공정을 특징을 효율적으로 분석하기 위하여 배가스 재순환 공정에서는 낮은 산소 농도에 의한 영향과, 배가스가 재순환 되는 위치에 따른 영향을 살펴보았다. 가스 주입 공정의 경우에는 추가되는 기체 연료로 인하여 전체 고체 연료의 감소가 고려되었고, 주입되는 위치는 상류로 설정하였다. 추가 가스 연료의 농도는 매우 희박하므로 고온인 약 1000K에서 가스 연료의 연소가 시작하게 된다.[6] 따라서 베드의 상부에서 주입될 경우 코크스의 연소가 일어나는 고온 영역 윗부분에서 연소가 이루어지므로 상부에 부족한 열을 보충하기 위해서는 베드의 상부에서 연소가 이루어지는 베드 상류에 주입하여야한다.

다음의 Table 2에는 두 가지 공정의 해석을 하기 위한 케이스를 요약하였다. 배가스 재순환 소결 공정의 경우에는 배가스를 흡인 하는 위치는 하류(900s-1100s)로 고정한 상태에서 배가스를 재순환 하는 위치를 상류와 하류로 나누어 살펴보았다. 흡인하는 위치에서 배가스의 조성은 산소 15%, 수분 15%, 이산화탄소 10%, 질소 7

Table 2 Calculation cases

Case name	Oxygen rate(%)	Increased flow rate(%)	Injected location(s)
FGR Upstream	18	15%	150s-700s
FGR Downstream	18	15%	900s-Final
Case name	Reduced Coke(%)	Replaced Gas Fuel(%)	Concentration of gas fuel(%)
SFG 10-25%	10	25	1.06
SFG 10-50%	10	50	2.11

0%로 가정하였고, 주입되는 구간의 길이에 따라 공기와 혼합하여 주입된다고 가정하여 18%의 산소농도로 주입되는 것으로 하였다. 이때 추가된 팬을 통해 증가하는 전체 유량은 15이다. 각 케이스에서 낮은 산소 농도가 상류와 하류에 미치는 영향과 증가한 풍량에 의한 영향을 살펴보는 해석이 진행되었다. 가스 연료 주입 소결 공정의 경우에는 상부에 부족한 열을 보충하기 위하여 주입하는 위치는 상류(200s-600s)로 고정하였다. 주입되는 가스 연료의 농도는 코크스 열량 28.25 MJ/kg, 가스 연료의 열량은 메탄으로 가정하여 50.18MJ/kg로 설정하여 코크스 감소량과 대체되는 가스 연료의 양을 계산하여 정하였다. 가스 연료의 연소는 1000K에서 일어나는 것으로 가정하였다.[6] 테이블의 케이스와 비교하기 위한 Reference 케이스는 기타 공정을 적용하지 않고 주입가스를 공기로 사용한 케이스이다.

Fig. 2는 각 케이스별 베드내 온도 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프의 가로축은 시간축으로써, 실제 공정에서 일정한 속도로 이동되는 베드의 움직임을 1-D unsteady 해석결과에서 시간의 흐름으로 대체하여 결과를 표현 하였다. 베드의 온도 분포는 비교적 흰색으로 표현된 구간을 기준으로 온도가 높은 구간은 철의 용융이 일어나는 1300K 이상의 고온 구간이고, 바깥부분 중에서 1000K 이상의 구간은 베드내 고체연료인 코크스의 연소가 이루어지는 구간이다. FGR 케이스에서 음영으로 표현된 구간은 배가스를 흡인하는 구간인(900s-1100s)구간이고 Upstream 케이스 경우에는 실선부분에 배가스가 재순환되고 Downstream같은 경우에는 음영부분부터 후단까지 배가스가 재순환 되었다. SFG 케이스에서는 실선으로 표현된 구간에 가스 연료가 주입되었다. 각각의 케이스에서 온도분포를 살펴보면 배가스 재순환 같은 경우, 베드 상부에서 유입되는 풍량이 15% 증가하였기 때문에 Reference 케이스와 비교하여 주입된 산소의량과 유속이 빨라진 것이기 때문에 온도 분포가 가팔라지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 베드내의 연소가 빨라지는 효과를 나타내는 것이기 때문에 소결공정의

Table 3 Sintering time

Case name	Sintering Time(s)	Decrement(%)
Reference	1198	-
FGR Upstream	1106	7.67
FGR Downstream	1100	8.18
SFG 10-25%	1165	2.75
SFG 10-50%	1178	1.67

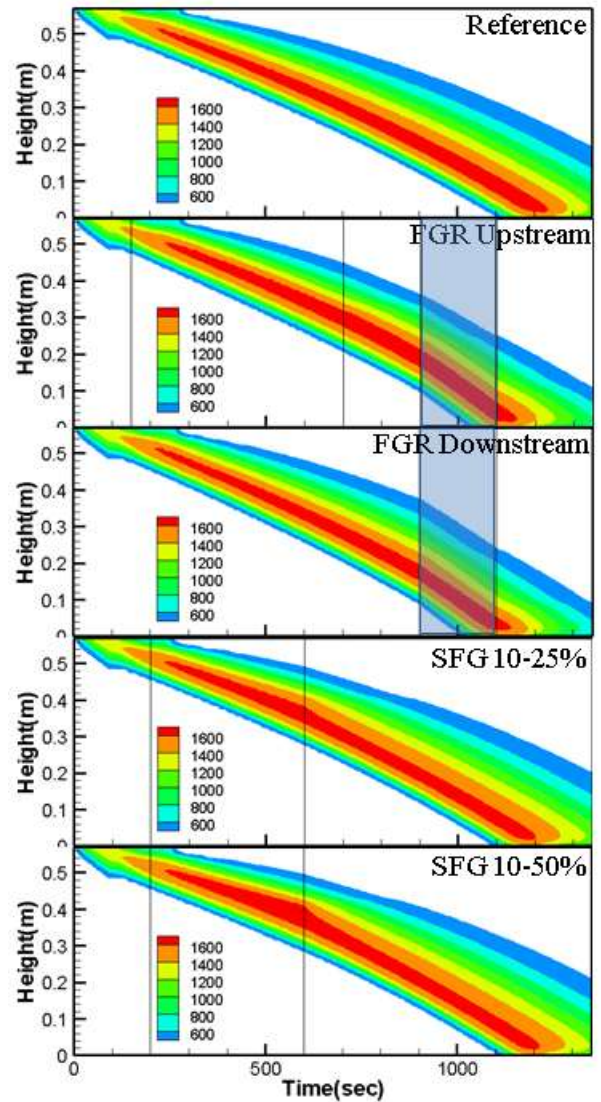


Fig. 2 Temperature distribution in the bed

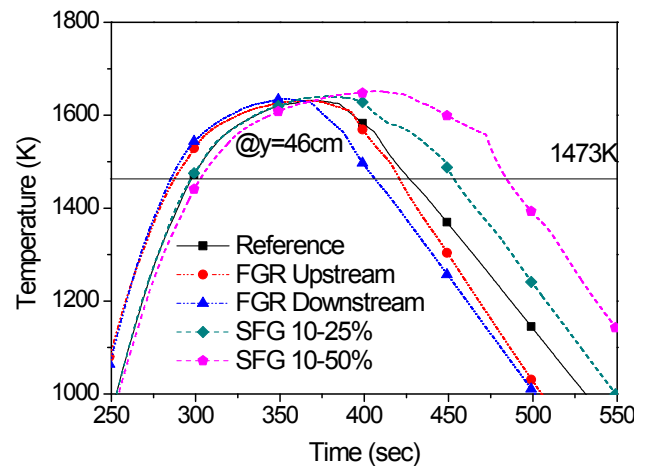


Fig. 3 Temperature history diagram at the upper part of the bed

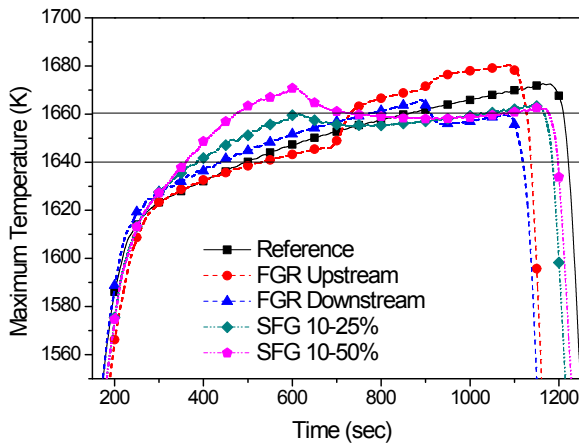


Fig. 4 Maximum Temperature of the bed

생산성이 증가한 것으로 볼 수 있다. 낮은 산소농도에 의한 효과는 베드의 연소를 지연시키는 역할을 하게된다. 따라서 Upstream케이스와 Downstream 케이스의 상류(150s-700s)구간을 살펴 보게 되면 낮은 산소농도의 가스가 주입된 Upstream케이스의 기울기가 더 완만한 것을 알 수 있다. 반면 베드의 하부에서는 소결공정의 연소가 거의 끝나가는 시점이기 때문에 낮은 산소에 의한 연소율의 감소는 영향을 거의 미치지 않기 때문에 두 가지 케이스에서 비교적 일치한 양상을 보이게 된다. 가스 연료 주입의 경우, 가스 연료는 상류에 주입되어 상부의 온도를 상승시키는 것에 사용되기 때문에 주입된 구간에서 고온부의 영역이 늘어난 것을 확인 할 수 있다. 그리고 가스연료의 연소에 산소가 소모되면서 고체연료의 연소는 지연되기 때문에 기본 케이스와 비교하여 고온부의 기울기가 완만한 것을 알 수 있다. 하지만 주입된 고체연료의 량을 줄였기 때문에 베드내의 고체연료의 연소는 기본 케이스와 비교하여 거의 동일한 시간에 완료됨을 알 수 있다.

Table 3은 소결완료 시간을 나타낸 것이다. 소결 완료시간은 베드의 하부에서 가장 온도가 높은 지점의 시간을 나타낸 것으로 베드의 연소가 끝나는 시점으로 볼 수 있다. 소결공정에서 베드내의 고체연료의 연소가 끝나는 것은 기본적인 소결공정이 완료된 것이고 이후에는 고온의 소결광을 냉각하는 작업이 필요하게 된다. 배가스 재순환의 경우 낮은 산소 농도의 가스가 주입되어 베드내 고체 연료의 연소가 지연되나 주입되는 유량이 증가하여 소결 완료 시간은 감소하고 생산성이 증가됨을 알 수 있다. 특히 베드의 연소가 완료되는 시점인 베드 하류에 배가스를 주입한 Downstream 케이스에서 소결 완료 시간이 더욱 감소하였다.

Fig. 3은 베드 상단의 온도이력을 나타낸 것이다. 57cm베드의 상부의 한지점인 46cm의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에

표시된 1473K은 소결공정에서 소결광의 용융이 시작되는 온도를 나타내는 것으로 해당 온도 이상의 고온을 얼마만큼 유지하고 있는 가로 품질을 예측할 수 있다. 기본 케이스는 약 130s를 유지하게 되는데 가스 연료를 주입한 경우에는 30s, 55s의 고온 유지 시간이 증가한 것을 확인할 수 있고 이는 품질이 향상된 것으로 판단할 수 있다. 반면 배가스 재순환 케이스의 경우에는 증가한 유량으로 인하여 베드의 승온 속도와 냉각 속도가 증가하는 것을 볼 수 있는데 고온의 유지 시간은 기본케이스와 유사하게 유지하게 되고, 특히 유속이 증가한 채로 상류에 공기를 공급한 FGR Downstream 케이스의 경우에는 베드의 승온 속도와 냉각속도가 빨라 기본케이스보다 고온 유지시간이 짧아지는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 각 시간에서 베드내에 최고온도를 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 통해서 각 시간에서 가장 온도가 집중된 구간의 높이는 알 수 없지만 열이 집중된 정도를 간접적으로 확인할 수 있다. 이는, 해당 시간에서 베드의 연소가 어느 정도로 활발히 이루어지는지를 나타내고 균형된 최고온도의 유지는 균일한 품질을 의미하므로 그래프에 표시된 1640K-1660K의 최고 온도를 유지하는 공정이 적절하다고 판단된다. 해당 관점에서 살펴보았을 때, 배가스 재순환 공정의 낮은 산소농도의 영향은 최고온도를 낮추는 역할을 하기 때문에 최고온도가 높은 하부에 적절하고, 증가한 유량은 최고온도를 높이는데 적절하므로 베드의 상류에 적절하다. 하지만 베드 상류에 최고온도가 높아지더라도 온도이력그래프에서 보았듯이 고온을 유지하는 시간을 줄여주기 때문에 적절한 공정 운영이 필요하다. 가스 연료 주입 공정의 경우에는 줄여진 고체 연료의 영향으로 베드하류의 최고온도는 감소하여 적절한 온도를 유지하였다. 그리고 부족한 상류에서는 가스 연료의 주입으로 최고온도가 상승하여 적절안 운전 조건을 만족하나 SFG 10-50%케이스의 경우에는 최고온도가 너무 높게 상승하여, 적절한 가스 농도의 주입이 필요할 것으로 판단되었다.

본 연구는 제철 소결 공정을 단순화 하여 수치 해석에 적용하고, 소결공정에 열원으로 사용되는 고체 연료의 연소를 제어하는 배가스 재순환 및 가스 연료 주입 공정을 수치해석 모델을 통해 평가하였다. 해석을 통해 도출된 온도를 통하여 최고온도, 온도 이력, 소결완료시간 등의 지표들을 통해 각 공정의 품질 및 생산성을 예측하여 보았다. 현재의 결과는 각 공정의 특징을 모델을 통해 나타낼 수 있는가를 확인하는 작업을 나타낸 것이고 추후에는 최적의 운전 조건을 찾기 위한 해석이 수행될 것이다.

후 기

본 연구는 POSCO 기술 연구소와 한국과학기술원 가치제조기계사업단 (BK21)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] H. Toda, K. Kato, "Theoretical Investigation of Sintering Process" Trans. Iron Steel Inst. Jpn., Vol. 24, 1984, pp. 178-186.
- [2] N. Oyama, Y. Iwami, T. Yamamoto, S. Machida, T. Higuchi, H. Sato, M. Sato, K. Takeda, Y. Watanabe, M. Shimizu, K. Nishioka, "Development of Secondary-fuel Injection Technology for Energy Reduction in the Iron Ore Sintering Process" ISIJ Int. Vol.51, 2011, pp. 913~921.
- [3] W. Yang, C. Ryu, S. Choi, E. Choi, D. Lee, W. Huh, "Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid Phases", ISIJ Int. Vol.44, 2004, pp. 492-499.
- [4] HJ. Werz, J. Otto, J. Rengersem, 1995, Environmental protection in iron ore sintering by waste gas recirculation, MPT, Vol. 18, No. 4, pp.4
- [5] N. Oyama, Y. Iwami, T. Yamamoto, S. Machida, T. Higuchi, H. Sato, M. Sato, K. Takeda, Y. Watanabe, M. Shimizu, K. Nishioka, "Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process", ISIJ Int., Vol. 8, 2011, pp.913-921.
- [6] C. Robinson , D.B. Smith, "The auto-ignition temperature of methane", Journal of Harzardous Materials. Vol. 8, 1984, pp. 199-203.