

장입물 층상구조에 따른 고로 내 운전상황 예측 수식연구

양광혁, 최상민, 정진경*

한국과학기술원, *POSCO 기술연구소

Numerical Analysis on Thermo-fluid Flow Change in the Blast Furnace Due to Burden Distribution

Kwangheok Yang, Sangmin Choi, Jinkyung Jung*

KAIST, *POSCO Research Lab.

1. 서론

고로공정은 철광석을 환원시켜 선철을 생산하는 공정으로써 제선공정의 핵심이라 할 수 있다. 고로는 향류식 반응기(Counter current reactor)로써 철광석은 고로에 피코크스 및 석회석과 함께 장입되고, 고로 하부에서 1100°C 가량의 뜨거운 공기 또는 산소 부화공기가 풍구로 유입되어 코크스를 연소시키고 이로부터 발생하는 환원가스(CO, H₂)에 의해 장입물이 가열 환원 및 용해되어 선철과 슬래그가 출선구를 통해 배출된다. 고로내부는 일어나는 현상에 따라 피상대, 연화용착대, 데드맨, 연소대의 영역으로 나눌 수 있다. 고로 설비의 특성상 노 내의 현상을 파악하기 위한 실측이 어려운 부분이 많이 있다. 실제 고로의 해체와 같은 작업은 경제적, 시간적인 면에서 효과적이지 못하기 때문에 노 내 현상 이해에 대한 난점이 존재한다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 기본적인 노 내의 현상에측 공정 운전 조건의 실시간 예측 그리고 공정을 제어하기 위한 모델링이 많이 이뤄지고 있다. 실제 고로 모델링에 관한 많은 연구가 일본을 중심으로 진행되어 왔으며 기술적으로 선도하는 위치에 있다.

현재까지 진행된 고로 모델링을 살펴보면, Yagi 등은 고체, 기체, 액체, 입자의 4상을 고려하여 정상상태 2차원 모델을 수립하였다.[1], 또한 BRIGHT 모델에서는 장입분포 모델을 고려하여 장입물의 온도분포나 화학조성뿐만 아니라 장입물의 분포를 예측하였다.[2] 또한 최근에는 2차원 모델뿐만 아니라 3차원 정상상태 모델[3], 비정상상태 모델[4] 등이 개발되었다.

환원가스의 유동분포를 제어하기 위해서 노 상부에서의 코크스와 철광석의 장입을 조절할 필요가 있다. 이것을 위해 실제 고로 조업에서는 노정에서 장입되는 코크스층과 철광석층의 두께를 profimeter를 이용하여 측정, 관리하고 있는데 이로부터 얻어지는 데이터를 통해 코크스와 광석의 장입이 적절히 이루어지고 있는지를 판단할 수 있는 근거가 필요하다. 이를 위해서는 노 상부에서 측정된 장입물의 profile을 이용하여 노 전체에서의 장입물의 층상구조를 예측하고 이러한 층상구조가 노 내 운전상황에 미치는 영향을 평가할 필요가 있게 된다. 따라서 이 연구에서는 노 상부에서 측정된 반경방향의 광석층과 코크스층의 두께비 (Lo/Lc) 데이터를 이용하여 노 전체의 층상구조를 구하고 이 층상구조를 바탕으로 고로 내에서의 열유동 현상을 해석하여 노 내 층상구조의 변화가 노 내의 운전상황에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 한다.

2. 고로 공정 모델링

고로 모델링은 이전 연구[5]에서 발표된 모델을 사용하였다. 정상상태 축대칭 2차원 모델을 고려하였고, 고체와 가스 2상을 고려하였다. 광석은 Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO와 Fe로 구성되고 코크스는 C로만 구성되어 있다고 생각하였고, 가스상은 일반적인 가스 구성성분으로 구성된다. 각 상의 물성치는 각 구성성분의 물성치에 질량분율을 고려하여 구하게 된다. 장입

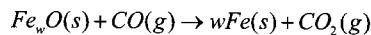
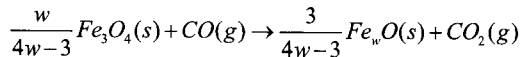
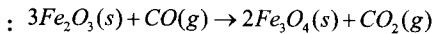
물의 층상구조를 고체유동과 초기층상 구조로부터 구하고 그 층상구조로부터 격자를 구성하였다. 모델링을 위한 주요 가정을 아래에 나타내었다

- (1) 가스의 유동을 고려하기 위해 Ergun's equation을 적용하였다.
- (2) 고체의 속도는 포텐셜 흐름으로 가정한다.
- (3) 광석과 코크스의 층상구조는 광석층과 코크스층의 반경방향의 두께비 데이터와 고체상의 속도에 의해 구해진다 또한 이 과정에서는 반응에 의한 고체상의 소멸을 고려하지 않았다.
- (4) 연소대에서의 현상은 이 모델에서 해석하지 않고 간단한 열물질 정산을 통해 구해진 단열화염온도와 가스의 조성을 경계조건으로 적용하였다
- (5) 데드맨의 형상은 가정하여 계산을 수행하였다
- (6) 용착대의 형상은 온도범위로써만 정의하여 온도에 따라 용착대의 형상이 바뀌는 것으로 생각하였다.

지배 방정식은 이전 연구[5]에서와 마찬가지로 가스, 고체 유동과 가스, 고체의 에너지 보존식, 화학종 보존을 고려하게 된다. 또한 각 지배방정식의 소스항에는 반응에 의한 상간 물질전달, 상간 열전달, 반응열이 반영되게 된다. 이 모델에서 고려하는 반응은 철광석과 환원 가스에 의한 간접환원반응과 코크스층에서의 solution-loss만을 고려하였으며 각 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 각 반응의 반응속도는 참고문헌[1]을 참고하였으며, 광석의 환원반응속도는 3계면 모델을 사용하여 모사하였다.

Solution-loss 반응 : $C(s) + CO_2(g) \rightarrow 2CO(g)$

철광석 간접환원반응



모델의 해석방법은 다음과 같다. 고로 내의 열유동 현상을 풀기 위해서는 우선 고로 내 층상구조를 구해야 한다. 일단 고체 유동장을 구하고, 그로부터 유선과 timeline을 구하고 이 결과와 Lo/Lc데이터를 이용하여 모사된 초기 층상구조를 조합하여 노 전체에서의 층상구조를 예측하였다. 고로 해석 모델은 앞에서 구한 층상구조와 격자를 이용하고 운전조건을 입력 파일로부터 읽어들이어 각 지배 방정식을 순서대로 풀어주게 된다. 각 지배방정식의 풀이는 Finite volume method를 이용한다. 고체의 온도가 1323~1623K의 범위에 들어가게 되면 용착대로 가정하고 계산을 다시 반복한다. 이러한 과정을 모든 계산이 수렴할 때까지 반복하게 된다. 계산의 자세한 과정은 이전 연구[5]에서 기술하였기 때문에 본 논문에서는 생략한다.

3. 계산 조건 및 결과

온도 해석 대상이 되는 고로의 노상에서의 shaft까지의 높이는 32m이며, 노의 내부체적은 4200m³이다. Table 1에는 실제 고로조업에서 사용되는 운전조건을 나타내었다. 하루에 약 9000톤의 선철을 생산하는 설비로써 계산에 필요한 입출 물질량, 등을 나타내었다. 노 내 장입물의 입경과 공극률은 Ergun equation과 고-기체간 열전달 계수에 사용되어 유동과 온도 분포에 중요한 영향을 미친다. 계산에 사용된 장입물의 성상은 Table 2과 같다. 처음 장입되는 코크스와 철광석의 평균입경은 각각 47.7mm, 21.4mm이고, 공극률은 각각 0.45와 0.36의 값으로 주어진다. 데드맨과 용착대는 낮은 투과율로 인해 가스상의 유동이 원활하지 못하게 되는데 이러한 현상은 공극률을 0.10으로 조정하여 반영하였다.[5]

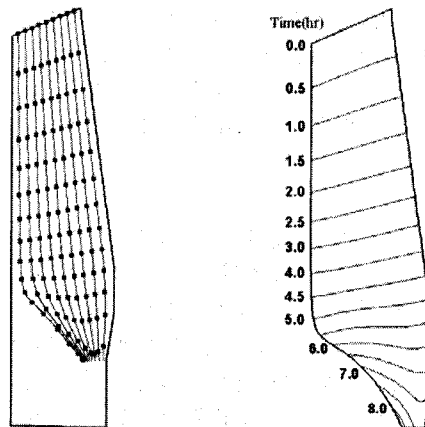
Fig. 1에 장입물의 유동에 대한 해석결과를 나타내었다. Stack에서는 유동이 plug flow의 형태를 나타내고 있으며, 아래로 내려오면서 노의 폭이 넓어지기 때문에 속도는 전체적으로 작아지게 된다. belly를 지나면서 유동은 연소대를 향해 모이게 되고 이동거리의 차이로 인하여 노벽 쪽에서의 유동이 노 중심에서의 유동보다 빨리 연소대에 도달하는 것을 관찰할 수 있다. 앞에서의 고체유동 결과를 바탕으로 노내 장입물의 층상구조를 구할 수 있다 고체 유동에서 나온 속도장을 이용하여 유선(streamline)을 구하면, flow는 유선을 따라 흐르기 때문에 유선상에서의 속도를 이용하여 각 점에서의 시간을 구할 수 있다. Fig.1의 (b)에서는 Timeline을 시간단위로 나타내었다. 앞에서의 결과와 마찬가지로 stack에서는 plug flow의 형태를 띄고 있으며 belly를 지나면서 부터는 데드맨과 연소대의 영향으로 인하여 벽쪽에서의 강하속도가 빠른 것을 볼 수 있다. 또한 장입물이 연소대까지 도달하는 시간은 7.5~8시간이 소요되는 것을 관찰할 수 있다.

Top Gas Pressure	0.277 MPa
Blast Volume	6150 Nm ³ /min
Blast Pressure	0.4182 MPa
Blast Temperature	1191 °C
Production Rate of Pig Iron	9284 t/d
O ₂ Rate	333.3 Nm ³ /min
Blast Moisture	19.2 g/Nm ³
PCR	15.86 kg/s
Coke Rate	36.71 kg/s
Ore Rate	176.22 kg/s

Table 1. Operational condition

Material	Layer	d _p (mm)	ε	φ
Coke	Stack Zone	47.7	0.45	0.90
	Deadman	47.7	0.10	0.90
	Raceway	47.7	0.80	0.90
Ore	Stack Zone	21.4	0.10	0.84
	Cohesive Zone	21.4	0.36	0.84

Table 2. Layer properties



(a) Streamline of solid flow (b) Timeline
Fig. 1. Streamline of solid flow and timeline

Fig. 2에 계산에 사용된 세 가지 Lo/Lc 데이터를 비교하였다. 기준조건인 Case A를 살펴 보면 중심에서 약 1.5m까지는 중심코크스의 장입에 의해 Lo/Lc 값이 1보다 작은 것을 알 수 있다. 그 이후 급격히 상승하여 2m근처에서는 약 4의 값을 가지고 약 3m에서 다시 상승하여 3.7m에서 최대값인 7.0이 되고 벽 쪽으로 갈수록 다시 값이 줄어들어 약 1의 값을 보이는 것을 알 수 있다. Case B와 C는 기준조건과 같은 분포를 가지지만 중심 코크스의 반경이 줄어드는 것을 알 수 있다. Case B는 약 1.2m, Case A는 약 0.6m에서 Lo/Lc 값이 1.0이 되는 것을 알 수 있고 그로 인해 벽쪽에서의 Lo/Lc 가 1.0이 되는 구간은 기준조건에서보다 그만큼 커진다.

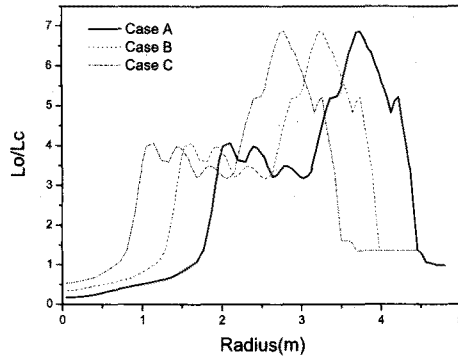


Fig. 2. Lo/Lc data for calculating of burden distribution

Fig. 2에서의 Lo/Lc 데이터와 앞에서 구한 고체상의 속도를 이용하여 층상구조를 계산하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 계산의 편의성을 위해 층상구조의 형상을 따라 피상대 (stack)에서의 격자를 구성하였다.

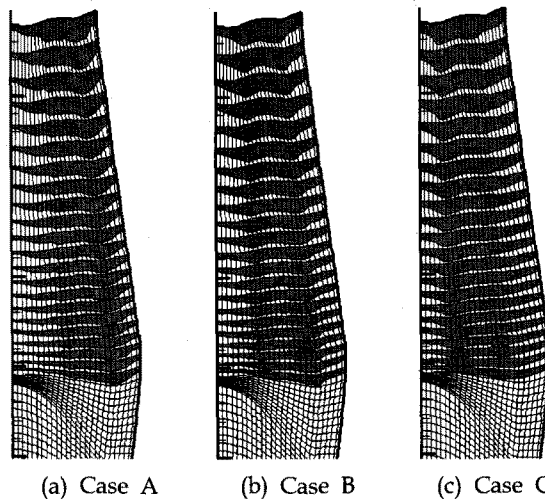


Fig. 3. Lo/Lc data for calculating of burden distribution

Fig. 3에서 구해진 층상구조와 격자를 이용하여 고로내에서의 각 상의 온도 유동, 조성 등을 계산하였다. Fig. 4에서는 기준조건에 대하여 계산된 고체상의 온도, 광석의 조성을 나타내었다. 장입물은 노정에서 300K의 온도로 장입되지만 풍구에서의 취입되어 상승하는 가스의 열전달로 인해 온도가 점점 상승하게 된다 그리고 최종적으로는 연소대로 약 2100K

의 온도로 나가게 된다. 온도분포를 살펴보면 가운데보다 노중심과 벽측의 온도가 더 높은 것을 알 수 있다. 이것은 입력조건으로 들어간 Lo/Lc데이터(Figure 3-4)와 장입물 총상분포 (figure 3-10)의 결과에서 알 수 있듯이 노중심과 벽측에는 가운데서보다 상대적으로 많은 양의 코크스가 장입이 되고 코크스의 입경이 광석의 입경보다는 크고 그로 인해 투과성도 크기 때문에 가스의 흐름이 원활하게 된다. 그러므로 상대적으로 장입물의 온도가 올라가게 된다. 하지만 실제 장입물의 총상구조를 살펴보면 벽쪽에 장입되는 광석은 다른 곳보다 입경이 작기 때문에 통기성이 저하되어 온도가 낮을 것이다. 하지만 이번 연구에서는 광석과 코크스의 입경을 모두 균일하게 주었기 때문에 이러한 영향은 고려하지 못하였다 용착대($T_s=1323\sim 1623K$)는 온도가 제일 낮은 곳을 기준으로 풍구로부터 약 7~9m의 높이에 분포하게 된다. Fig. x에는 광석의 각 성분들의 질량분율을 나타내었다. 처음에 장입되는 광석은 오직 hematite(Fe_2O_3)로만 구성되어 있다고 생각하였는데, 이 hematite는 장입되면 magnetite(Fe_3O_4)로 전환되게 되고 1100K에서 반응이 종료, 다시 magnetite는 wustite로 wustite는 iron으로 전환된다. 광석의 조성분포는 온도분포와 비슷한 경향을 보이게 되는데 온도가 높은 노중심과 벽측에서의 반응이 활발하게 일어나기 때문에 그 부분에서 조성이 먼저 변화하게 된다.

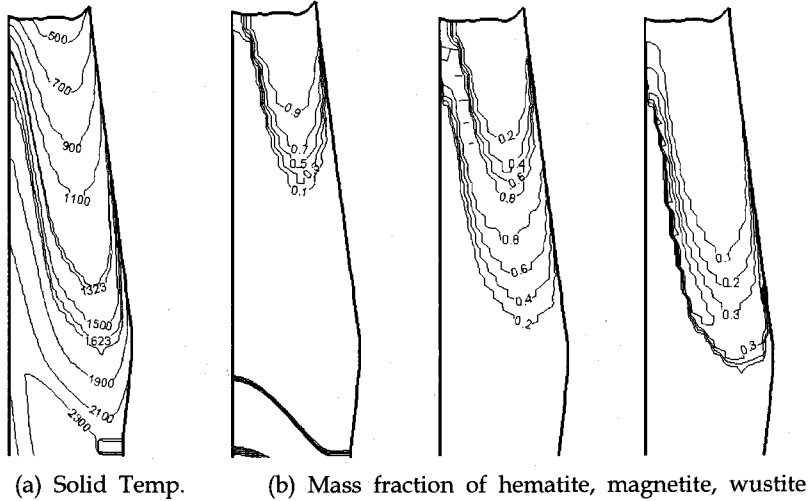


Fig 4. Solid temperature and mass fraction of ore for Case A

Fig. 5에 계산에서 구한 결과를 $r/R=3.2/4.8$ 지점이 되는 곳을 기준으로 높이방향으로의 광석의 조성과 가스상에서의 CO와 CO₂의 조성분포를 도시하였다. 약 18m의 높이에서 hematite가 magnetite로 전환되며, magnetite는 다시 wustite와 iron의 순으로 환원된다. 가스조성을 살펴보면 연소대를 지난 가스는 CO 42%, CO₂ 0%로 구성되어 있지만 존재하지만 환원반응이 진행됨에 따라 CO로 전환되어 노정에서는 CO 약 24%, CO₂ 28%로 조성이 거의 비슷해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 Case B와 Case C에 대한 고체상의 온도를 나타내었다. 기준조건에서와 마찬가지로 Lo/Lc의 값이 작은 부분에서의 온도가 높은 것을 볼 수 있다 또한 기준조건과 비교했을 때 중심코크스의 장입 반경이 줄어들었기 때문에 중심부에서의 온도분포가 높은 부분의 영역이 줄어들게 된다.

4. 결론

층상구조의 변화가 노 내의 운전상황에 미치는 영향을 살펴보기 위한 수식 모델을 수립하였다. 측정된 Lo/Lc데이터로 층상구조를 구하고 그것을 바탕으로 격자를 구성하였다. 구해진 층상구조를 이용하여 고로 모델링에 적용하여 노 내 열유동 현상을 해석하였다. 구해진 노 내 온도 분포를 통해 가스의 유동이 Lo/Lc의 영향을 받는 것을 알 수 있었고, 이러한 유동의 변화는 온도장이나 화학종 분포에도 영향을 미치게 된다. 향후 연구에서 이러한 영향을 더욱 정량적으로 평가할 수 있는 연구가 진행되어 하며 압력 및 노내 온도의 실측 데이터와 비교하여 이 수식모델의 타당성을 검증할 필요가 있다.

5. 후 기

본 연구는 POSCO 기술연구소와 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받아 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

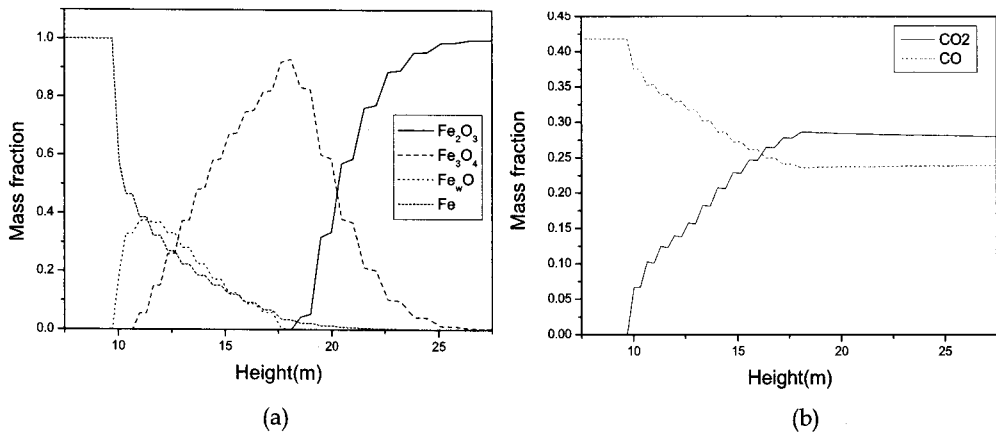


Fig. 5. Mass fraction of (a) hematite, magnetite, wustite and iron and (b) CO and CO_2 gas

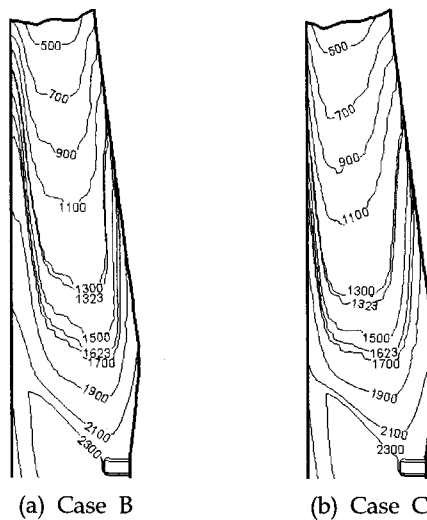


Fig. 6. Solid temperature for Case B and Case C

5. 참고문헌

1. P.R. Austin; H. Nogami and J.Yagi. A Mathematical Model of Four Phase Motion and Heat Transfer in the Blast Furnace, ISIJ International, 37, 1997, 458-467.
2. Takashi Sugiyama and Masayasu Sugata. Development of Two-Dimensional Mathematical Model for the Blast Furnace "BRIGHT", Nippon Steel Technical Report 35, 1987, 32-42.
3. J.A. Castro; H. Nogami and J. Yagi. Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based in the Multifluid Model, ISIJ International 39, 1999, 15-22.
4. K. Takatani, T. Inada and Y. Ujisawa, "Three-dimensional Dynamic Simulator for Blast Furnace", ISIJ International 39, 1999, 15-22.
5. 양광혁; 최상민; 정진경. 장입물 층상구조에 따른 고로내 운전상황 변화 연구, 한국연소학회 추계 학술대회, 2006, 145-150