

## 장입물 층상구조에 따른 고로내 운전상황 변화 연구

양광혁\* · 최상민\* · 정진경\*\*

### A Study on Operation Condition of Blast Furnace According to Burden Distribution

Kwangheok Yang\*, Sangmin Choi\* and JinKyung Jung\*\*

#### ABSTRACT

At the furnace top, the distribution of charging coke and ore is adjusted to control the reducing gas flow distribution in the furnace. It is necessary to predict operation condition of blast furnace according to the burden profile to judge whether charging is properly conducted. In this study, we propose the model for predicting while layer structures within furnace when top burden profile was given. Layer structure of coke and ore could be predicted by top burden profile and solid velocity. Solid velocity is assumed as potential flow. Potential function distribution and timeline are also calculated using solid velocity field. The calculation is conducted for different burden profile cases. As the result burden distribution and grid structure, which is deformed to match the layer structure in shaft and deadman profile. Gas flow was calculated using this grid, and calculated results are compared with each other.

**Key Words** : Blast furnace, Modeling, 2D, Layer structure, Coesive zone, burden distribution

#### 기 호 설 명

$C_p$	Specific heat (kJ/kg·K)	$\psi$	Solid velocity potential
$d$	Diameter(m)	$h_{gs}$	Heat transfer coefficient between gas and solid
$G$	Mass flow rate (kg/m <sup>2</sup> ·s)	PCR	Pulverized coal rate
$k$	Thermal conductivity (W/m·K)		
$P$	Pressure(Pa)	하첨자	
$T$	Temperature (K)	$g$	gas phase
$\epsilon$	Porosity	$s$	solid phase
$\phi$	Shape factor		

#### 1. 서 론

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

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* POSCO 기술연구소 제선연구그룹

† 연락처, iop45@kaist.ac.kr

공기 또는 산소 부화공기가 풍구로 유입되어 코크스를 연소시키고 이로부터 발생하는 환원가스(CO, H<sub>2</sub>)에 의해 장입물이 가열, 환원 및 용해되어 선철과 슬래그가 출선구를 통해 배출된다. 고로내부는 일어나는 현상에 따라 괴상대, 연화용착대, 데드맨, 연소대의 영역으로 나눌 수 있다. 고로의 생산기술로는 조업안정화, 생산성 증대, 연료비 절감, 설비의 대형화 형식으로 이뤄지는데 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 현상예측, 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.[1,2,3], 또한 BRIGHT 모델에서는 장입분포 모델을 고려하여 장입물의 온도분포나 화학조성뿐만 아니라 장입물의 분포를 예측하였다.[4] 또한 최근에는 2차원 모델뿐만 아니라 3차원 정상상태 모델[5], 비정상상태[6] 모델 등이 개발되었다.

환원가스의 유동분포를 제어하기 위해서 노 상부에서의 코크스와 철광석의 장입을 조절할 필요가 있다. 이것을 위해 코크스와 철광석의 profile에 대한 정확한 측정이 이루어져야 하고 이를 위해 profitemeter가 사용되게 된다. 전통적인 profitemeter의 종류로는 mechanical profitemeter와 microwave profitemeter가 사용되는데 이로부터 얻어지는 데이터를 통해 코크스와 광석의 장입이 적절히 이루어지고 있는지를 판단해야 한다.

이를 위해서는 노 상부에서 측정된 장입물의 profile을 이용하여 노 전체에서의 장입물의 층상구조를 예측하고 이러한 층상구조가 노 내 운전 상황에 미치는 영향을 평가할 필요가 있게 된다. 이 연구에서는 초기 장입물의 층상구조로부터 노 전체의 층상구조를 구할 수 있는 방법을 제시하고, 주어진 장입물 profile에 대해 모델을 통해 층상구조를 구하여 결과를 확인하였다. 또한 구해진 층상구조와 이전 연구[4]에서의 정상상태 2차원 모델을 이용하여 층상구조가 노 내 운전 상황에 미치는 영향을 파악하기 위한 향후 연구 방법을 제시한다.

## 2. 고로 공정 2차원 모델링

### 2.1. 모델링 주요 내용

고로 모델링은 이전 연구[7]에서 발표된 모델을 사용하였다. 정상상태 축대칭 2차원 모델을 고려하였고, 고체와 가스 2상을 고려하였다. 고체상은 Fe와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 C로 구성되고, 가스상은 일반적인 가스 구성성분으로 구성된다. 각 상의 물성치는 각 구성성분의 물성치에 질량분율을 고려하여 구하게 된다. 이전 모델과 다른 점은 장입물의 층상구조를 고체유동과 초기층상 구조로부터 구하고, 그 층상구조로부터 격자를 구성하였다.

### 2.2. 지배방정식

지배 방정식은 이전 연구[7]에서와 마찬가지로 가스, 고체 유동과 가스, 고체의 에너지 보존식, 화학종 보존을 고려하게 된다. 각각의 보존식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

#### 가스유동

가스의 흐름은 층진층에서의 실험식을 2차원으로 확장한 Ergun's equation을 이용한다.

$$-\nabla P = (f_1 + f_2 \left| \vec{G}_g \right|) \vec{G}_g$$

여기서,

$$f_1 = 150 \frac{(1 - \varepsilon_i)^2 \mu}{(\phi dp_i)^2 \varepsilon_i^3 \rho_g}, \quad f_2 = 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_i)}{\phi dp_i \varepsilon_i^3 \rho_g}$$

#### 고체유동

Chen 등의 실험결과[8]로부터 shaft에서의 고체의 유동은 거의 plug flow와 비슷한 것을 알 수 있고 이 모델에서의 주요 관심사가 노 하부쪽이나 데드맨을 구하는 것보다는 shaft에서의 층상구조를 구하는 것에 있기 때문에 고체유동을 포텐셜흐름으로 다루는 것이 간단하고 타당한 방법이라 생각된다.

$$-\nabla \psi = \vec{G}_s$$

$$\nabla \cdot (-\nabla \psi) = \nabla \cdot \vec{G}_s = 0$$

가스와 고체상 사이의 상간 열전달이 고려되기 때문에 각각의 에너지 보존식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

#### 가스 에너지

$$\nabla \cdot (\vec{G}_g C_p T_g - k_g \nabla T_g) = h_{gs} A_{gs} (T_s - T_g)$$

#### 고체 에너지

$$\nabla \cdot (\vec{G}_s C_p T_s - k_s \nabla T_s) = h_{gs} A_{gs} (T_g - T_s) - \sum (-\Delta H_j) R_j$$

### 2.3 열전달 & 화학반응

**열전달**

고체상과 가스상 사이의 열전달 계수는 Ranz-Marshall equation을 이용하고, Hatano에 의해 제안된 scaling factor,  $\gamma$ 값을 사용한다.[9]

$$h_{gs} = \gamma \frac{k_g}{d_s} (2.0 + 0.6 Re_{gs}^{1/2} Pr_g^{1/3})$$

**2.3 계산 조건**

**2.3.1. 운전조건**

온도 해석 대상이 되는 고로의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 노상에서의 shaft까지의 높이는 32.m이며, 노의 내부체적은 4200m<sup>3</sup>이다.

Table 2에는 실제 고로조업에서 사용되는 운전 조건을 나타내었다. 하루에 약 9000-1000톤의 선철을 생산하는 설비로써 계산에 필요한 입출 물 질량, 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 3과 같다. 코크스와 철광석의 평균입경은 각각 47.7mm, 21.4mm이고, Fig. 에서와 같이 노 중심에서 벽면으로 반경방향으로 비례하여 작아진다고 가정하였다. 데드맨과 융착대는 낮은 투과율로 인해 가스상의 유동이 원활하지 못하게 되는데 이러한 현상은 공극률을 0.10으로 조정하여 반영하였다.[10]

**Table 2 Operating condition of blast furnace**

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

**Table 3 Layer Properties**

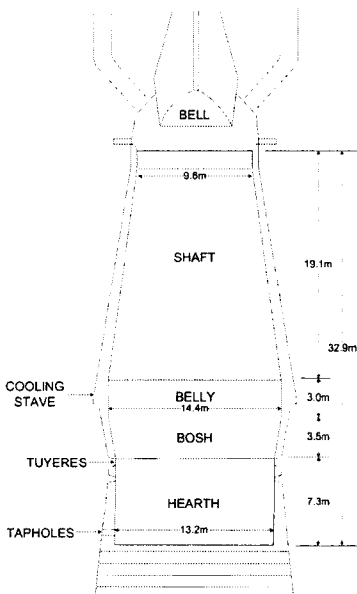
Material	Layer	d <sub>p</sub> (mm)	ε	φ
Coke	Stack Zone	47.7	0.45	0.90
	Deadman	47.7	0.10	0.90
	Raceway	47.7	0.80	0.90
Ore	Stack Zone	21.4	0.10	0.84
	Cohesive Zone	21.4	0.36	0.84

**2.3.2. 경계조건**

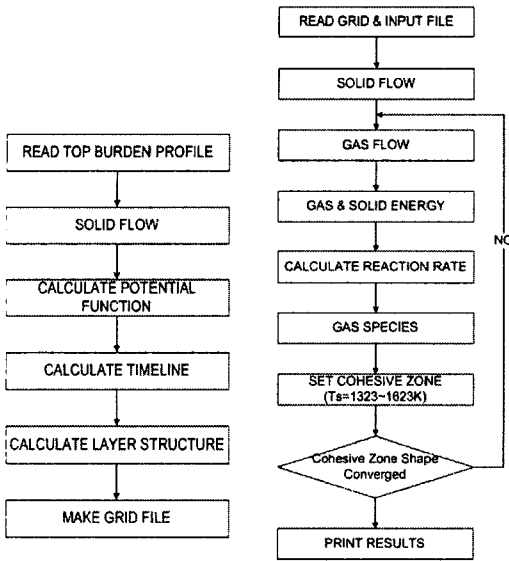
각 스킨라 양에 대한 경계조건은 Axis에서는 대칭조건에 의해 각 값의 구배가 0이 된다. 각 상의 입구에서는 온도조건과 각 상의 성분이 경계조건으로 들어간다. 또한 출구에서는 스킨라양의 구배가 0이 되게 된다. 노벽외면에서는 냉각수로 냉각을 해주기 때문에 이로 인한 열손실을 고려하였다. 온도를 제외한 나머지 스킨라양은 벽면에 대한 구배가 0이라는 조건을 사용하였으며, 노상에서는 온도조건을 1800K로 주었다. 실제로 노상의 온도는 용융된 선철과 슬래그의 온도로 정의되기 때문에 따라 지정해 줄 필요가 없지만 현재 모델에서는 액상을 고려하지 않기 때문에 고체, 기체상 각각에 대해서 온도 조건을 경계값으로 주었다.

**3. 수치해석 방법**

모델의 수치해석 부분은 크게 장입물의 층상구조를 구하는 부분과 구해진 층상구조를 이용하여 노내 유동, 온도 등의 운전조건을 구하는 부분으로 나뉘게 된다. 수치해석시 격자는 층상구조의 형상을 따라서 구성하는 것이 격자내에서의 물질, 성상을 주는 것이 편리하기 때문에 구해진 층상구조를 이용하여 구한다. Fig. 2에서는 위에서 말한 두 부분에 대한 계산 순서를 나타내고 있다.



**Fig. 1 Schematic Diagram of Blast Furnace**



(a) Making Grid (b) Blast Furnace Model  
Fig. 2 Calculation Procedure

층상구조를 이용하여 격자를 구성하는 순서는 다음과 같다. 일단 고체 유동장을 구하고, 그로부터 유선을 구한다. 고체는 유선을 따라 흐르기 때문에 유선에서의 속도를 이용하면 각 지점을 지나가는 시간을 알 수 있다. 여기서 구한 timeline과 주어진 맨 위쪽 광석과 코크스의 층상구조를 이용하면 노 전체의 층상구조를 구할 수 있다. 이 층상구조를 따라서 격자를 구성하고 고로 해석 모델의 입력파일로 사용한다.

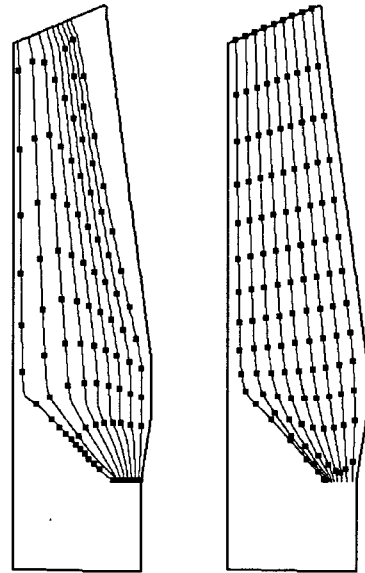
고로 해석 모델은 앞에서 구한 격자를 이용하고 운전조건을 입력파일로부터 읽어들이어 각 지배 방정식을 순서대로 풀어주게 된다. 각 지배방정식의 풀이는 FVM[11]을 이용한다. 고체의 온도가 1323~1623K의 범위에 들어가게 되면 융착대라고 가정하고 계산을 다시 반복한다. 이러한 과정을 융착대의 형상이 수렴할 때까지 반복하게 된다.

#### 4. 수치해석 결과

Fig.3에 고체유동에 대한 해석결과를 나타내었다. Shaft에서는 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 층상구조

를 구할 수 있다. 고체유동에서 나온 속도장을 이용하여 유선(streamline)을 구하면, flow는 유선을 따라 흐르기 때문에 유선상에서의 속도를 이용하여 각 점에서의 시간을 구할 수 있다.

Fig. 4에 고체유동에 대한 timeline을 시간단위로 나타내었다. 앞에서의 결과와 마찬가지로 shaft에서는 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. 여기서 나온 Timeline을 이용하면 장입물의 층상구조를 구할 수 있다.



(a) Gas phase (b) Solid phase  
Fig. 3 Streamline

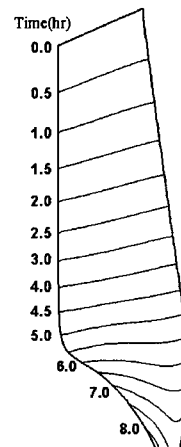


Fig. 4 Timeline for Solid Flow

맨 위쪽에서의 층상구조와 고체의 유동장이 주어지면 두 결과를 바탕으로 노 전체의 층상구조를 구할 수 있다. 초기 층상구조는 장입모델로부터 예측하거나 측정결과로부터 구할 수 있다.

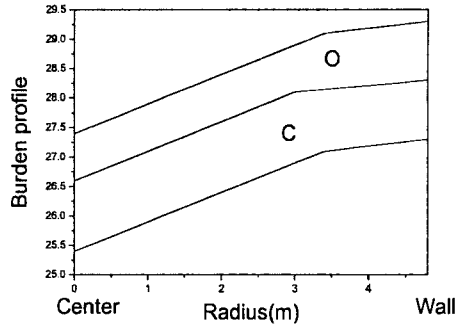
Fig. 4에서는 계산에 사용된 초기 층상구조를 나타내었다. 초기 층상구조는 Fig. 4와 같이 광석층과 코크스층 한 쌍이 포함되게 된다. 광석층의 위쪽에서에서의 시간을 0으로 두고, 다음 광석층 위쪽까지의 시간 T를 구한 다음, 위에서 구한 timeline을 이용하여 다음 광석층 위쪽 경계의 위치를 구하게 된다. 마찬가지로 코크스층에서도 마찬가지로의 방법을 적용하여 노 전체에서의 층상구조를 구할 수 있다.

Fig. 5에서는 계산에 사용된 노정 장입물의 profile을 나타내고 있다. Type A는 Type B에 비해 코크스와 광석이 반경방향으로 균일하게 존재한다. Type B는 노 중심에는 코크스의 양이 훨씬 많은 것을 볼 수 있다. Fig. 6에서는 두 가지 경우에 대해 층상구조를 구하여 격자를 구성한 결과를 나타내었다. Shaft에서는 코크스와 광석의 층상구조를 따라서 격자를 구성하고, 데드맨에 대해서도 형상을 따라서 격자를 구성해주게 된다. stack과 데드맨의 사이의 bosh에는 코크스로 차 있다고 가정하게 된다. bosh는 stack과 같이 처리하는 것이 물리적으로 타당하지만 layer의 일부가 연소대와 데드맨에 의해 적절히 처리되지 않기 때문에 층상구조를 고려하지 않고 코크스만으로 차 있다고 가정해준다. 또한 실제로 bosh부분은 실제 조업에서 용착대 아래쪽 부분이 되기 때문에 이러한 가정이 타당하다.

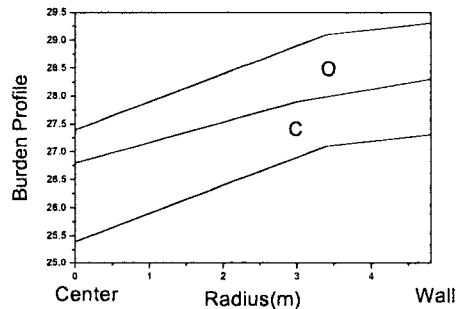
Fig. 7에는 맨 위쪽 layer에서 구한 수직방향으로의 질량유량 분포를 나타내었다. Type B의 경우에 Type A에 비해 코크스가 노중심에 많이 분포하고 코크스의 공극률이나 입경이 철광석보다 크기 때문에 노중심으로 많은 유량이 흘러가고 노벽에서는 광석층이 더 두껍기 때문에 유량이 더 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 유량분포는 온도분포와 반응속도에도 영향을 미치게 되고 이로 인해 고로 내 전반적인 운전상황에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

### 5. 결론 및 향후연구

1) 노 내 고체유동의 결과와 초기 장입물의 profile로부터 노 전체에서의 장입물 층상구조를 예측할 수 있는 모델을 작성하였다. 이 모델을 이용하여 두 가지 다른 경우에 대해서 노 전체에

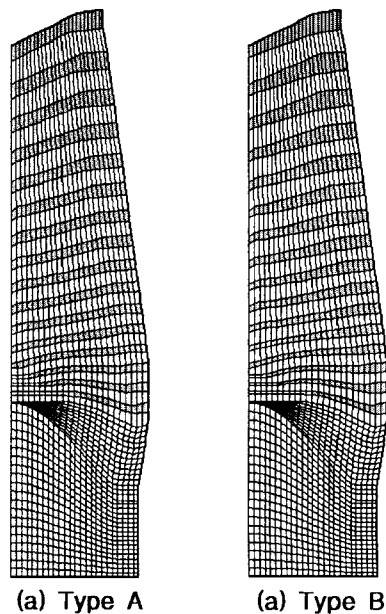


(a) Type A



(a) Type B

Fig. 5 Top Burden Profile



(a) Type A

(a) Type B

Fig. 6 Layer structure Within Blast Furnace

서의 층상구조를 구하고 그것을 바탕으로 격자를 구성하였다. 이 격자구성을 이용하여 기존의 고로 모델링에 적용하여 계산을 수행할 수 있다. 또한 이 격자를 이용하여 계산된 유동조건을 살펴보면 장입물의 층상구조에 의해 영향을 받는 것을 관찰할 수 있다. 노 중심에 많은 양의 코크스가 장입되면 노 중심에서의 유동이 많아지게 된다. 이러한 유동의 변화는 온도장이나 화학종 분포에도 영향을 미칠 것으로 추정되고, 향후에 이러한 영향을 살펴볼 수 있는 더욱 자세한 연구가 필요할 것이다.

2) 현재는 초기 장입물 profile을 가정하여 모델을 시험하는 단계이지만, 향후 연구에서는 실제 microwave profiler에 의해 측정된 결과를 초기 장입물 profile로 사용하여 계산할 예정이다. 또한 실제 고로 조업에서는 광석과 코크스가 번갈아 장입되는 것 외에도 두 사이클마다 한 번씩 중심 코크스가 장입된다. 중심 코크스는 중심 부분의 투과성을 높여 유동이 원활하게 해주기 때문에 이에 의한 영향도 살펴봐야 할 것이다.

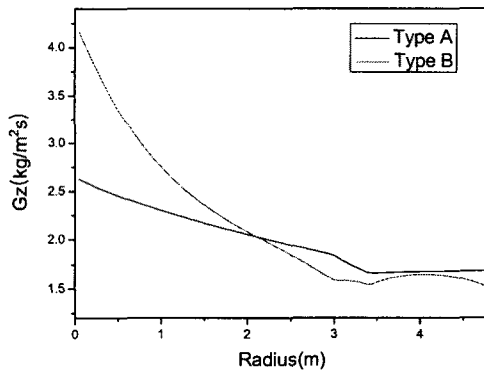


Fig. 7 Vertical Gas flow rate distribution along radial direction

## 후 기

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

## 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, pp. 458-467.

[2] P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi, "A Mathematical Model for Blast Furnace Reaction Analysis Based on the Four Fluid Model", *ISIJ International* 37, 1997, pp. 748-755.

[3] P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi, "Analysis of Actual Blast Furnace Operations and Evaluation of Static Liquid Holdup Effects by the Four Fluid Model", *ISIJ International* 38, 1998, pp. 246-255.

[4] Takashi Sugiyama and Masayasu Sugata, "Development of Two-Dimensional Mathematical Model for the Blast Furnace 'BRIGHT'", *Nippon Steel Technical Report* 35, 1987, pp. 32-42.

[5] 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, pp. 15-22.

[6] K. Takatani, T. Inada and Y. Ujisawa, "Three-dimensional Dynamic Simulator for Blast Furnace", *ISIJ International* 39, 1999, pp. 15-22.

[7] 양광혁, 최상민, 정진경, "용착대 예측을 위한 고로공정 모델링", *KOSCO SYMPOSIUM 논문집* 32, 2006, pp. 39-45.

[8] J. Chen, T. Akiyama, H. Nogami, J. Yagi and H. Takahashi, "Modeling of Solid Flow in Moving Beds", *ISIJ International* 33, 1993, pp. 664-671.

[9] M. Hatano and K. Kurita, *Tetsu-to-Hagane* 66, 1980, pp. 1898.

[10] J. Yagi, K. Takeda and Y. Omori, *Tetsu-to-Hagane* 66, 1980, pp. 1888.

[11] Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", *Taylor & Francis*, pp. 83-85.