

제철용 로터리 킬른 내의 연소 및 환원을 포함한

입자 거동 예측모사 해석

한우주* · 장권우* · 한가람* · 허강열*

Simulation of Particle Beds with Combustion and Reduction in Steel Making Rotary Kilns

Woojoo Han*, Kwonwoo Jang*, Karam Han*, Kang Y. Huh*

ABSTRACT

We simulate the particle bed motions with combustion and reduction in steel making rotary kilns. The particle bed motions are simulated by a Lagrangian approach called Discrete Phase Model (DPM). To reduce the number of tracking particles, the Coarse Grain Model (CGM) was applied. The model for particle motions showed good agreements with experimental results. In addition to the particle motion, the combustion and reduction simulation was performed. The combustion and reduction simulation can consider heat, mass and momentum transfer between the gas phase and particle beds.

Key Words : Rotary Kiln, Particle Motion, Steel Making, Discrete Phase Model, Coarse Grain Model

로터리 킬른은 회전하는 원통형 환원로 이다. 제철 공정에서는 전기로를 통해 철광석을 환원하는 공정이 널리 이용 되는데, 이때 공정 효율을 높이기 위해 전기로 투입 전, 로터리 킬른에서 입자 크기를 균일하게 하고, 탈 수분 과정을 거치며 온도를 높여 예비 환원 반응을 거치게 된다. 장입물은 킬른의 축을 따라서 이동하여 충분히 승온과 환원이 일어나도록 수 시간 동안 킬른 내부에 체류하게 된다. 로터리 킬른의 내부현상을 이해하기 위해서는, 장입물 거동과 기체의 연소 그리고 기체와 장입물 간의 물질, 운동량 그리고 열전달을 고려하여야 한다. 따라서 킬른 내부의 현상을 예측하기는 매우 까다롭다. 본 연구에서는 장입물 거동 및 기체 연소 그리고 장입물과 기체의 상호작용을 고려한 3차원 해석을 수행하고자 한다.

입자 거동은 Lagrangian approach인 Discrete Phase Model(DPM)을 사용하였다. [1] DPM에서 입자 거동은 입자의 운동량 보존 식에 따라 계산이 되며 입자와 기체간의 운동량 교환은 Dra-

g Force Term 에 의해서 결정이 된다. 입자가 충돌 할 경우, 입자간의 운동량 전달은 Spring-Damper model 에 의해서 계산된다.[2] DPM 방식은 입자의 거동을 실제와 거의 유사하게 모사할 수 있지만, 실제 입자를 모두 추적해야 하므로 계산 부담이 커지게 된다. 이러한 계산 부담을 줄이기 위해서 Coarse Grain Model(CGM)이 사용되었다. CGM은 여러 입자를 하나의 입자로 묶어서 처리하여 추적해야 할 입자 수를 감소시켜 전체 계산 부담을 줄일 수 있는 방식이다.[3] 기체상 해석에서는, 난류 해석을 위해 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 연소 모델은 Eddy Dissipation Model(EDM)을 사용하였다.

이번 연구에서 적용할 입자 거동 모델인 CGM이 적용된 DPM이 실제 로터리 킬른의 거동을 예측할 수 있는지 알아보기 위해서 Pilot scale의 로터리 킬른의 거동에 대한 실험 사례를 해석하였다. [4] Fig.1 은 입자 거동을 검증할 Pilot scale 로터리 킬른의 단면 모식도이다. 모델 검증에 사용할 계산 조건은 Table. 1에 나타나 있다.

* 포항공과대학교 기계공학과

† 연락처, huh@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2841 FAX : (054)-279-3199

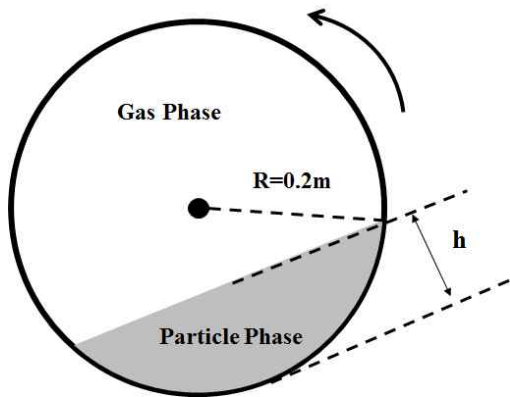


Fig.1 입자 거동 검증용 로터리 킬른 모식도 (축 방향 길이는 0.46m)

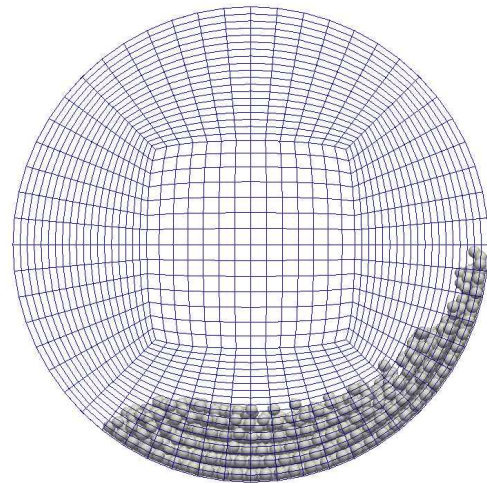


Fig.2 Case4 의 입자 거동(Rolling Mode)

Table 1 입자 거동 검증 계산 조건

Case #	RPM	h (m)
1	10	0.035
2	10	0.045
3	10	0.053
4	10	0.07
5	0.5	0.035
6	0.5	0.045
7	0.5	0.053
8	0.5	0.07

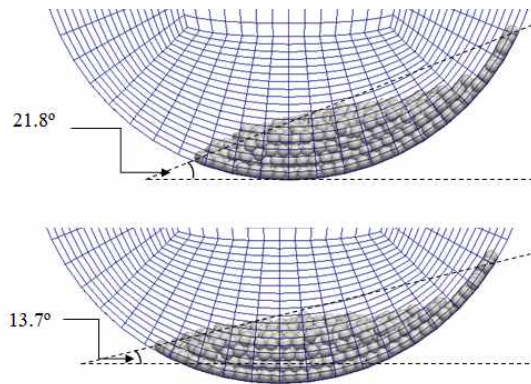


Fig. 3 Case6 의 입자거동 (Slumping Mode)

킬른의 회전 속도가 10rpm일 경우, 입자 거동은 Fig. 2 와 같이 Rolling Mode로 나타났다. 이는 논문에서 언급한 Regime Map과 일치하는 결과이다. 회전속도가 0.5 rpm일 경우는 Case 8을 제외하고 모두 Fig. 3 과 같이 Slumping Motion이었다.

Case 8은 Rolling Mode로 나타났는데, 이는 입자 계산 시 사용되었던 마찰계수가 정확하지 않은 값이기 때문에 나타나는 결과로 추측된다. 따라서 마찰계수 값을 개선 한다면, 보다 정확한 예측이 가능 할 것이다. Fig. 4는 논문에서 언급된 로터리 킬른의 입자 거동 Regime Map과 계산 결과를 비교한 그림이다.

현재는 로터리 킬른 내부의 연소 및 환원현상에 대한 실험 사례 [5]를 이용하여 연소 및 환원 해석 모델의 검증작업을 수행 중에 있다. 검증에 사용할 로터리 킬른의 형상 및 조건은 Fig. 5에 나타나 있다.

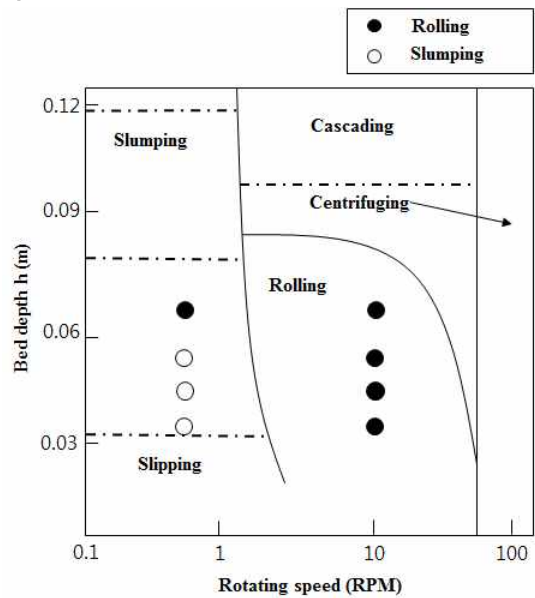


Fig. 4 Regime Map과 계산 결과 비교 [3]

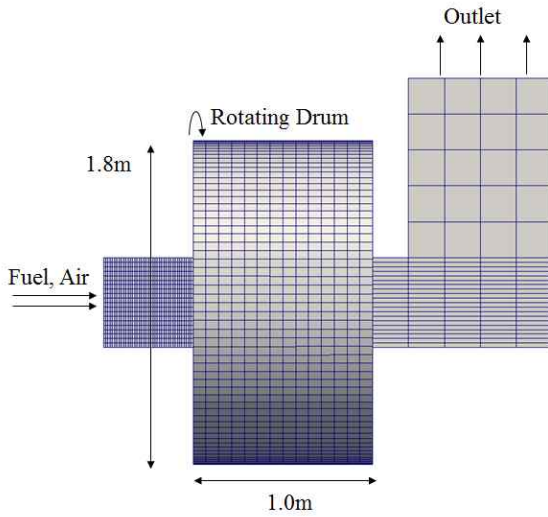


Fig. 5 환원 해석용 로터리 킬른 모식도 [4]

Property	Value
RPM	0.33
Raw materials	Ore-NC, Anthracite, Limestone
Ore-NC mass (kg)	560
Anthracite mass (kg)	101
Limestone mass (kg)	44.0
Particle shape (mm)	30x25x15
Fuel	LPG
Fuel mass flow rate(m ³ /h)	30
Air mass flow rate(m ³ /h)	709.5

Table. 2 환원 해석용 로터리 킬른 계산 조건 [4]

참고 문헌

[1] Fluent 14.0 Theory Guide, Ansys Corp, pp 388-391
 [2] Stefan Luding, "Introduction to Discrete Element Methods", EJECE, Vol 12, Issue 7-8, pp 785 - 826, 2011
 [3] Mikio Sakai et al, "Verification and validation of a coarse grain model of the DEM in a bubbling fluidized bed", Chemical Engineering Journal, Vol. 244, 2014, pp 33-42
 [4] H.Henein, J.K. Brimacombe and A.P Watkinson, "The Modeling of Transverse Solids Motion in Rotary Kilns", Metallurgical Transactions B, Vol 14B, 1983, pp. 207 - 220
 [5] Hitoshi Tsuji, "Behavior of Reduction and Growth of Metal in Smelting of Saprolite Ni-ore in a Rotary Kiln for Production of Ferro-nickel Alloy", ISIJ Int, Vol. 52, 2012, No. 6, pp. 1000-1009