

# 1차원 기체-고체 반응기 모델의 로터리킬른 환원로 적용

한택진\* · 최상민\*\*

## Simplified 1-Dimensional Model of Gas-Solid Reactor

### : Adapting to Coal Reduction Rotary Kiln

Taekjin Hahn\*, Sangmin Choi\*\*

#### ABSTRACT

Rotary kiln furnace is one of the most widely used reactors in industrial field. In this paper, 0-dimensional heat and mass balance for direct coal flame rotary kiln was performed preferentially, then a simplified 1-dimensional model was developed based on 0-dimensional analysis data to proceed additional thermal analysis. Compared the results with the currently operating rotary kiln data to validate 1-dimensional model. Through this procedure, it can help to derive fundamental idea for design and operation of rotary kiln.

**Key Words** : Coal Reduction Rotary Kiln, Simplified 1-Dimensional Model, Thermal Analysis, Heat Transfer, Mass and Heat Balance

현재 산업계에서 널리 쓰이는 기체-고체 반응기에는 순환유동층 보일러와 로터리킬른 등이 있다. 그 중에 로터리킬른은 산업계에서 널리 사용되는 반응기로 석회 및 시멘트 제조, 각종 금속의 환원, 폐기물 처리, 소각 등에 사용된다. 로터리킬른은 원통형 용기로 수평에 대해 약간 기울어진 형태( $1^\circ \sim 3^\circ$ )로 설치되며, 축에 대해 느린 속도로 회전시키면서 킬른의 위쪽으로부터 투입된 연료와 원자재를 이동시켜 반응시킨다. 로터리킬른은 거의 모든 원료물질에 적용가능하고, 전처리 과정을 거치지 않고 소각 및 연소가 가능하며, 처리목적에 따라 온도와 체류시간을 적절하게 조절이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 소량의 처리에 부적합하고, 내화재의 손상이 심하여 미연분과 비산분진이 많이 발생할 수 있으며, 다른 반응기에 비하여 열효율이 비교적 낮다는 단점이 있다. 로터리킬른은 공정방식에 따라 습식과 건식, 열매체와 원료의 접촉 방식에 따라 병류식과 역류식, 가열방식에 따라 직접 가열식과 간접 가열식으로 분류할 수 있다[1].

본 연구에서는 1차원 기체-고체 반응기 모델을 Fig. 1에서와 같이 단순화시킨 직접가열식 석탄환원 로터리킬른 환원로(역류식)에 적용하여

열반응해석을 하였다. 먼저, 열역학적 접근을 위한 기초적인 방법으로, 질량 보존법칙과 에너지 보존법칙을 바탕으로 하는 0차원 물질 및 열정산을 수행하였다. 0차원 열물질정산을 통해 얻은 로터리킬른 환원로에 필요한 환원탄 투입량, 공기 주입량, 배출되는 연소 가스량 등 기본 자료들을 바탕으로 단순화 된 1차원 로터리킬른 모델을 구성하여, 1차원으로 확장시킨 열반응해석을 수행하였다. 운전 조건으로는 현재 국내에서 운전 중인 로터리킬른 환원로를 고려하여 적용하였고, 해석 대상이 되는 로터리킬른의 정보는 Table 1에서와 같다. 한편, 1차원 모델을 통하여 해당 구간에서의 온도 계산 결과 값과 현재 운전 중인 로터리킬른 환원로의 온도분포와 고체유량의 비교를 통하여 1차원 모델의 유효성을 확보하였다.

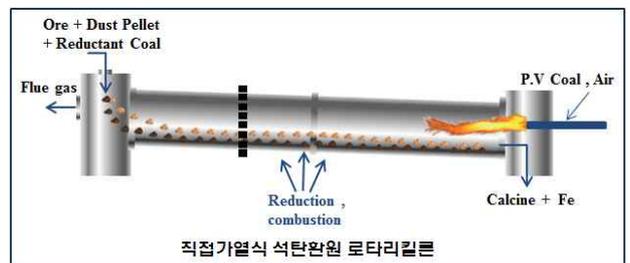


Fig. 1 Diagram of simplified direct flame rotary kiln

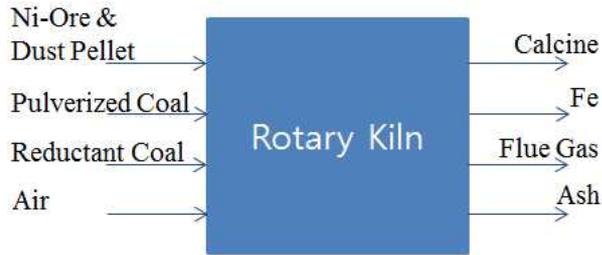
\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 연락처, [smchoi@kaist.ac.kr](mailto:smchoi@kaist.ac.kr)

TEL : (042)350-3030

**Table 1** Information of rotary kiln

길이	131m
직경	5.5m
고체 성상	$Fe_2O_3 + SiO_2$
회전 속도	1.5rpm
고체 충전률	8%
화염길이	20m



**Fig. 2** Diagram of 0-dim. heat and mass balance

**Table 2** 0-Dim. mass balance in rotary kiln

투입 물질 (kg/s)	원료	43.8333
	미분탄	3.0000
	환원탄	1.9880
	주입공기	50.5228
배출 물질 (kg/s)	환원된 Fe	3.1988
	Calcine 생성량	29.6167
	배기가스	65.8222
	Ash	0.7064

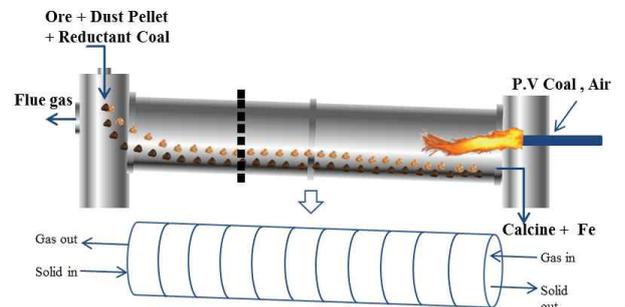
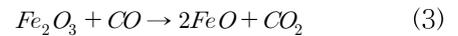
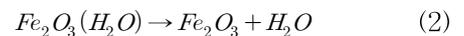
**Table 3** 0-Dim. heat balance in rotary kiln

투입 열량 (kW)	석탄 발열량	89,145	97.28%
	원료 현열	1,090	1.19%
	미분탄 현열	79	0.09%
	환원탄 현열	52	0.06%
	주입공기 현열	1,269	1.39%
배출 열량 (kW)	Calcine의 현열	23,721	25.89%
	환원된 Fe의 현열	1,866	2.04%
	환원 반응열	545	0.59%
	배기가스 현열	24,010	26.20%
	Ash의 현열	396	0.43%
	수증기 현열	11,645	12.71%
	수분 증발열	21,975	23.98%
	벽면 열손실	5,475	5.97%
고려 못한 열손실	2,002	2.18%	

0차원 물질 및 열정산에서 투입물질은 Ni-Ore 와 Dust Pellet, 연료용 미분탄과 환원제로 쓰이는 환원탄, 주입공기가 있고, 배출물질로는 Calcine과 Ash, 배기가스가 있다. 열정산 항목에서는 입열로 원료의 현열, 연료의 현열, 환원탄의 현열, 주입공기의 현열이 있고, 출열에는 생성된 Calcine의 현열, 환원된 Fe의 현열, 배기가스의 현열, 재의 현열, 대류 및 복사 열전달에 의한 출열이 있다. 0차원 물질 및 열정산 계산 결과는 Table 2와 Table 3에서와 같다[2]. 0차원 열물질정산을 통해 로터리킬른 환원로에 필요한 환원탄 투입량 및 공기 주입량을 알 수 있다.

1차원 기체-고체 반응기 모델은 기체상과 고체상에 대해 Fig 3.에서와 같이 로터리킬른을 길이방향으로 n개의 균일한 검사체적으로 나누고 이를 하나의 셀이라고 생각하여 열물질 정산을 수행하는 방식이다[3]. 1차원 해석을 통해 로 내에서 길이방향에 대한 온도 변화 및 유량 변화에 대한 분석을 할 수 있다.

1차원 모델링을 위해서는 기하학적 분석 및 킬른에서의 열전달 해석과 환원 반응에 대한 고려가 필요하다. 직접가열식 로터리킬른에서는 가스층에서 고체층으로의 대류 및 복사열전달, 가스층에서 벽으로의 대류 및 복사열전달, 벽에서 고체층으로의 대류, 전도 및 복사열전달 벽에서 외부로의 대류 및 복사 열전달이 일어난다[4]. 하지만 본 연구에서는 외벽에서 단열되어 열의 출입이 없다고 가정하고, 가스층과 고체층 사이에서 발생하는 반응과 두 층 사이에서의 대류 및 복사 열전달(Fig. 4의  $Q_{cgs}$ ,  $Q_{rgs}$ )만을 단순하게 고려하여 모델을 작성하였다. 또한, 기체상과 고체상에서의 반응은 (1) - (3)에서와 같이 고려하였다.



**Fig. 3** Concept of 1-dimensional model

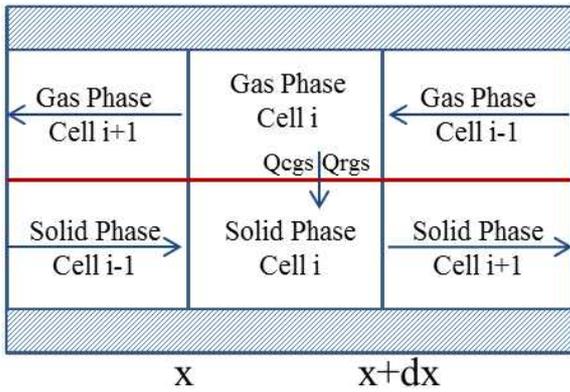


Fig. 4 1-Dimensional Cell Model Approach

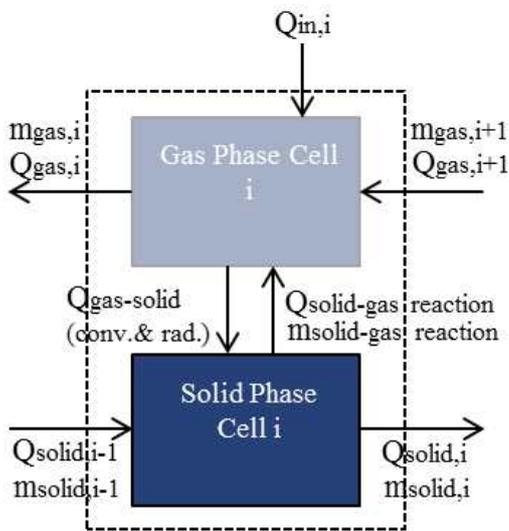


Fig. 5 Diagram of 1-Cell heat and mass transfer

화학반응은 비가역반응으로 1차 반응속도모형을 적용하였고[5], 공급된 열량 중 손실 열량을 제외한 열량은 고체의 승온과 반응에 소모된다고 가정하였다. Fig. 5에서는 가스 측  $i$ 번째 cell과 고체 측  $i$ 번째 Cell을 하나의 검사체적으로 보고 출입하는 물질과 열에 대하여 표시하였다.

1차원 열전달 해석의 결과로서 로터리킬른 연소로의 각 위치별 출입가스와 고체의 온도변화를 살펴보았다. 또한, 단순화 된 1차원 모델의 유효성을 알아보기 위하여 현재 운전 중인 로터리킬른 환원로의 지점에 따른 온도분포와 고체 유량의 비교를 수행하였다. 실제 운전 데이터는 특정 지점에 설치된 열전대를 이용하여 측정되었다.

Fig. 6과 Fig. 7의 그래프에서 실측값과 계산을 통해 얻은 값의 변화양상이 비슷한 경향을 보이는 것을 통해, 계산에 쓰인 1차원 모델의 타당성을 어느 정도 확인 할 수 있었다. 한편, Fig. 8는 실제 측정된 데이터는 없지만 1차원 모델을 통해 계산된 기체 유량 분포를 나타낸다.

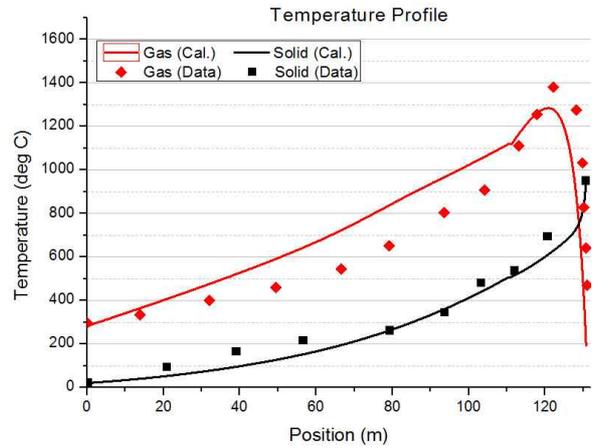


Fig. 6 Comparison of measured temperature data and calculated temperature profile

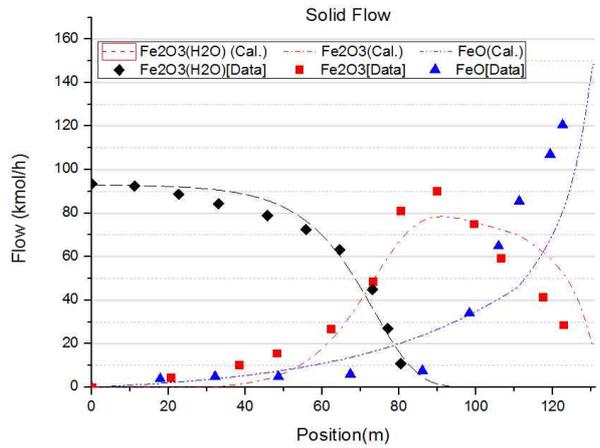


Fig. 7 Comparison of solid flow data and calculated solid flow profile

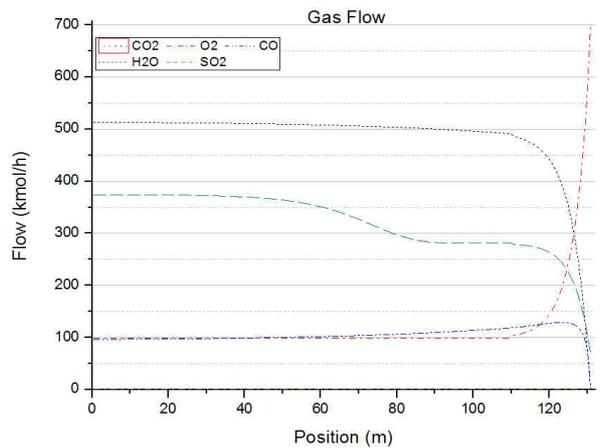


Fig. 8 Calculated gas flow profile

로터리킬른 연소로의 출입가스와 베드의 조건은 운전 조건 및 각 성분의 공급 유량 설정 등에 따라 다양하게 바뀔 수 있다. 또한, 1차원 모델링 과정에서 상당히 많은 부분에 대하여 단순화하고

가정하였으므로, 여기에서 단순화 된 모델링 및 가정된 조건에 따른 결과를 실제 공정의 상황과 직접 비교하는 것은 부적합하다. 하지만 기본적인 단계에서 수행된 모델링임을 감안하여 향후 보완을 통해 보다 복잡한 상황으로 확장시킨다면 개선된 모델을 얻을 수 있을 것이다. 또한, 비록 간단한 생각이었지만 이번 연구에서와 같이 해석하려는 대상에 대해 0차원에서 1차원으로 생각을 확장해나가는 시도를 통해 실제 운전 데이터와의 비교 확인함으로써, 로터리킬른 연소로의 설계 및 운전과 관련한 기본적인 아이디어 도출에 도움이 될 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 가치제조 기계사업단(BK21)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] A.A. Boateng, "Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes", Elsevier Inc, 2008.
- [2] Robert H.Perry, "Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7/E", McGraw-Hill, 1997
- [3] F.Mintus et al, "Wet Process Rotary Cement Kilns: Modeling and Simulation"
- [4] V.Venkateswaran and J.K.Brimacombe, "Mathematical Model of the SL/RN Direct Reduction Process"
- [5] Kaustubh S.Mujumdar et al, "Modeling of Rotary Cement Kilns Applications to Reduction in Energy Consumption"