

# 회전식 대향류 반응기 내 열전달 증진을 위한 리프터 설계와 1차원 열평형 모델로의 적용

이후경\* · 최상민\*\*

## Lifter Design for Enhanced Heat Transfer in Rotating Counter-Current Flow Reactor and Application to One Dimensional Heat Balance Model

Hookyung Lee\*, Sangmin Choi\*\*

### ABSTRACT

Rotary kiln reactors are frequently equipped with an axial burner with which solid burden material is directly heated. Lifters are commonly used along the length of the system to lift particulate solids and increase the heat transfer between the solid bed and the combustion gas. The material cascading from the lifters undergoes drying and reacting through direct contact with the gas stream. In this study, volume distribution of materials held within lifters was modeled according to the different lifter configuration and appropriate configuration was used for the design purpose. This was applied to the one-dimensional heat balance model of a counter-current flow reactor, which contributes to the increase of the effective contact surface, and thereby enhances the heat transfer.

**Key Words** : Rotary kiln reactor, Lifter design, Heat transfer, Heat balance model

우리가 최종적으로 사용하고자 하는 금속의 원료입자는 최초에 불순물 등과 함께 원석상태로 존재하기 때문에 이를 사용가능한 금속으로 만들기 위한 연속적인 제련과정이 필요하다. 여기에는 고체입자의 건조, 광석 내 금속추출을 위한 환원반응 등이 있으며 이런 물리화학적 현상들은 고체(원료)-기체(반응제)간 물질전달을 동반한다. 이 과정에서 전달율은 반응 특성상 많은 열을 요구하기 때문에 고온환경에서 공정이 이루어진다. 화로 내 고온환경을 만드는 대표적인 두 가지 방법 중 첫째는 화로 내에서 직접 화석연료를 연소 시킴으로써 연소가스를 사용하는 것이고, 둘째는 화로 외부 벽을 가열하여 내부를 고온환경으로 만들어 주는 것이다.

비교적 장시간 동안 대용량의 고체 및 기체반응물의 안정적인 열전달을 위해 로터리 킬른 시스템이 사용되어 왔고, 더 효율적인 열전달을 위해 반응물들은 대향류의 진행방향을 가진다[1,2]. 반응기 내에서 각 고체입자들의 고온 반응율을

얻기 위해 이들을 혼합시킬 필요가 있기 때문에 시스템은 동심축을 중심으로 회전하며[3], 목적한 물리화학적 현상이 완료된 후 중력을 이용하여 화로 출구로 생성물을 내보내기 위해 적절한 기울기를 가지게 된다. 이런 관점에서, 화로 내에서 열사용도를 증대시키는 것은 시스템을 효율적으로 사용할 수 있는 중요한 사항이다.

대향류 로터리 킬른 반응기 내에서 고체원료 장입물과 고온가스간 열전달 효과를 증진시키기 위해 화로 내벽에 리프터를 설치하는 것은 효과적인 방법이다[2]. 리프터의 역할은 회전식 반응기 바닥에 충전되어있는 고체입자를 상부로 들어 올려 낙하시키는 것이다. 이것은 실제로 리프터가 설치되지 않았을 때 연소가스와 직접 만나는 고체층의 접촉면 이외에 바닥에 고립되어 열전달에 활발히 관여하지 못했던 입자들을 활성화시키는 효과가 있다. 물리적인 관점에서 이는 고체층의 열전달 면적을 증대시키는 효과 또는 고온가스와 만나는 시간의 증가로 이어지고 결과적으로 반응을 더 활발하게 유도함으로써 (반응기 길이 감소 등의) 경제적 효과도 가져올 수 있다.

\* KAIST 기계공학과

† 연락저자, [smchoi@kaist.ac.kr](mailto:smchoi@kaist.ac.kr)  
TEL : (042)350-3030 FAX : (042)-350-3210

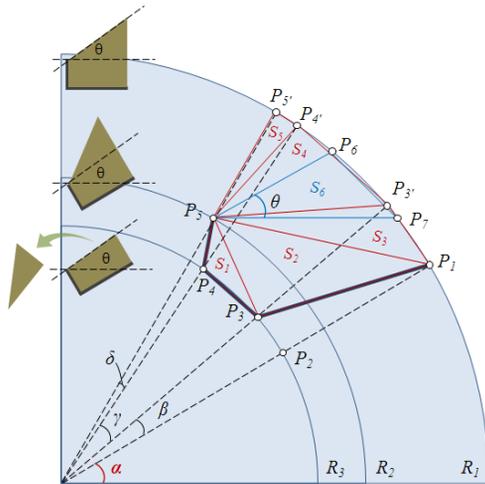


Fig. 1. Schematic of the lifter at temporary rotation.

이에 본 연구에서는 목적인 열전달 효과를 얻기 위한 적절한 리프터 형상 및 설치구간을 제시하기 위해 반응기 회전각에 따른 다양한 리프터 형상별 고체입자량 수용분포도를 수학적으로 모델링하였고, 이를 열전달 접촉면적으로 환산하였다. 또한 단순화된 일차원 대향류 열평형 모형에 적용하여 리프터 설치 전후 고체 장입물과 가스상의 온도 그래프를 예측해보았다.

리프터가 설치된 로터리 킬른 반응기 내에서 고체입자의 움직임을 예측하기 위한 연구는 실험실 규모에서 시스템의 단면사진 촬영을 통한 실험적 연구가 주로 진행되었다[4-9]. 이는 리프터 형상과 개수에 따른 고체입자의 분포를 쉽게 시각적으로 알 수 있는 장점이 있다. 하지만 대형 시스템을 묘사하는데 있어 그 장치 구성의 어려움으로 수학적 모델링이 필요하다. 원형 시스템의 회전각에 따라 리프터 내부에서 수용할 수 있는 고체 장입물의 부피를 모델링함으로써 입자들의 낙하분포도를 예측할 수 있다. 기본개념은 Fig. 1과 같이 리프터 내부에 쌓여있는 고체입자들이 수평기준 안식각 이상에서는 미끄러져 낙하한다는 것이다. 회전각에 따른 점들의 좌표를 구하고 각 점들을 이은 선의 길이, 헤론의 공식을 통해 면적이 구해진다. 그러므로 리프터 내부의 광석 부피는 물질의 안식각, 리프터 요소길이, 회전각에 대한 함수이다.

본 연구에서 제시한 리프터 형상에 따른 고체입자분포도 결과의 타당성을 검증하기 위해 이전 연구에서 보여준 결과와 비교하였다[7]. 해당 연구는 직경 1m인 원형 시스템에서 안식각 36°를 가지는 물질을 가지고 진행되었다. Table 1은 고려된 리프터 형상에 대한 정보이다. 구성요소들의 각도는 모두 수평면을 기준으로 시계반대방향으로 기울어진 값이다.

Table 1 Detail of the different segments of the lifters.

Type	Geometry	Segment size [m]	Inclination [°]
Lifter A		L1) 0.2	$\omega_1$ )180
Lifter B		L1) 0.2	$\omega_1$ )150
Lifter C		L1) 0.15 L2) 0.07	$\omega_1$ )180 $\omega_2$ )135
Lifter D		L1) 0.15 L2) 0.07 L3) 0.05	$\omega_1$ ) 180 $\omega_2$ ) 135 $\omega_3$ ) 90

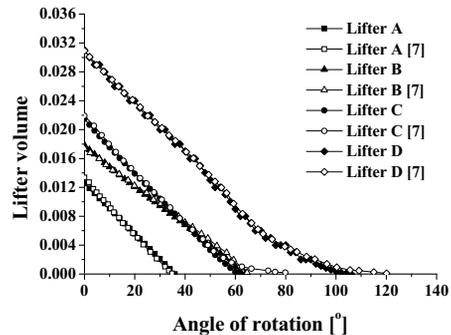


Fig. 2. Comparison of (a) modeling result in this study with (b) previous modeling result[7].

Fig. 2는 결과 비교 그래프로써 한 개의 리프터가 들어 올릴 수 있는 (0°에서) 초기 부피값과 회전각에 따른 분포형상이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 적절한 리프터 형상 결정시 물질을 충분한 시간동안 낙하시켜야 하는 것 이외에 제작 및 설치의 용이함 역시 고려되어야 한다. 그래서 본 연구에서는 Table 2와 같이 비교적 단순한 형태를 갖는 리프터 형상이 고려되었다.

Table 2 Considered lifter cases in design system.

	Geometry	Segment size [m]	Inclination [°]
Lifter A		L1) 0.5/0.4/0.3	$\omega_1$ ) 180
Lifter B		L1) 0.5/0.4/0.3	$\omega_1$ ) 150/135
Lifter C		L1) 0.5/0.4/0.3 L2) 0.4/0.3/0.2/0.1	$\omega_1$ ) 180 $\omega_2$ ) 150/120/90

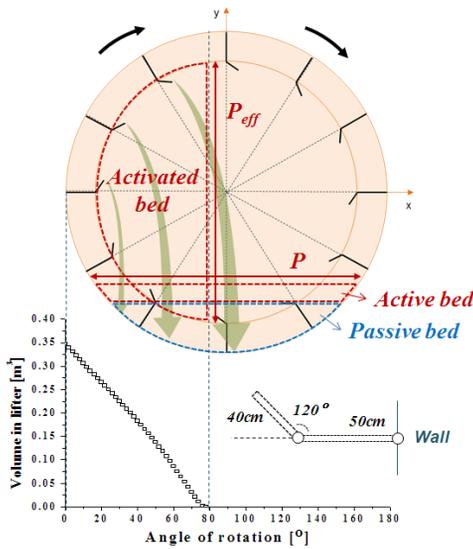


Fig. 3. Description of effective contact line ( $P_{eff}$ ) and activated bed for proposed lifter geometry.

본 연구에서는 5.5m 직경, 130m의 길이, 10%의 입자 충전율을 가지고 국내에서 운전 중인 대형 반응기가 고려되었다. 리프터의 base segment의 길이를 결정하는데 있어 시스템의 직경과 회전 구동상 안정성을 고려하여 30-50cm로 결정하는 것이 적절한 수준이라고 판단하였다. 광석량 수용도와 낙하 각도를 고려하여 최종적으로 (50cm-40cm-120dg) 형상이 제안되었다. 시스템 내 단위 길이당 리프터 개수는 설계 충전율 기준에서 수용도와 원통형 시스템 특성상 균형을 고려하여 12개가 선정되었고, 이를 종합적으로 나타내면 Fig. 3과 같은 분포도를 가질 수 있다. 리프터가 존재하지 않는 회전식 반응기를 다루는 이전 모델들에서는 바닥에 충전된 고체층을 상부의 열전달이 발생하는 층과 하부의 활성화되지 않는 층으로 구분하고 있다[10,11]. 본 모형에서는 리프터가 설치된 구간에서 상승된 고체입자량은 모두 활성화되어 열전달에 참여하게 된다.

대향류 반응기 내에서 장입물과 연소가스의 유량과 물성치를 가지고 1차원 온도분포를 구하기 위해 Fig. 4와 같이 단위구간 내에서 에너지 평형을 고려하여 엄밀하게 계산되었다. 시스템은 화염구역, 복사 집중구역, 대류 지배구역으로 나누었다. 복사 열전달은 화염구역과 그 후단에서 전체 열전달 메커니즘의 90%를 차지하고[2] 화염으로부터 거리가 멀어질수록 대류에 대한 영향이 중요하기 때문에[12-15] 본 시스템에서는 보조용 환원제와 산화제가 투입되는 위치를 중심으로 시스템을 구분하였다. 화염구간을 고려하는 대신 화염 후단에서 연소가스의 측정온도를 가지고 기체의 입구조건이 결정되었다.

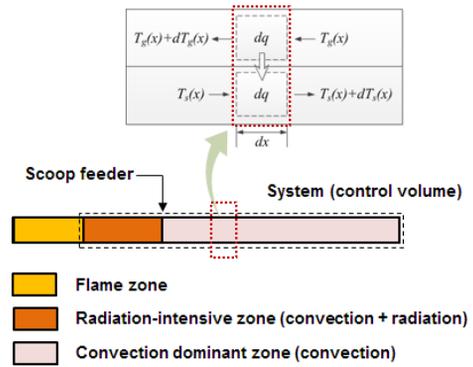


Fig. 4. Heat balance in the system.

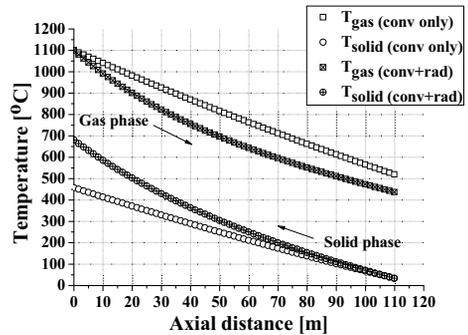


Fig. 5. Temperature profile when only convection was considered and both convection and radiation were considered [17].

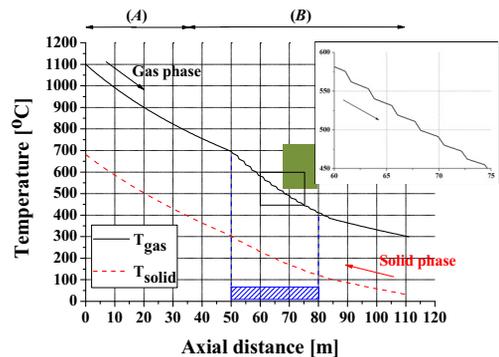


Fig. 6. Temperature profile after lifter installation. (A) and (B) mean radiation-intensive zone and convection dominant zone, respectively [17].

Fig. 5는 대류 및 복사 열전달을 고려했을 때의 온도분포이다[16]. 연소가스가 시스템 내에서 사용되고 배출되는 후단가스 온도를 살펴보면 400°C 근방으로 측정치와 거의 비슷하다. 이는 비교적 높은 온도로써 시스템 내부에서 보다 열사용을 높일 수 있는 리프터 설치 방안이 필요할

수 있다. 본 모델에서 가스 고체층의 접촉면적  $dA$ 는  $P \cdot dx$  형태로 표현되며 시스템 회전과 리프터에 의한 고체입자 부피의 낙하분포도를 통해 이는 활성화된 접촉면적으로 환산될 수 있다. 고려된 시스템에서 리프터가 없을 때 10%의 충전율에서  $P$ 값은 3.686m을 가지고 각 셀에서 전체 질량의 80%가 활성화 층으로 열전달에 참여하였다[17]. 리프터로 인해 80°까지 회전 시  $P_{eff}$ 값은 4.96m이 되고 모델에 적용된다 (Fig. 3 참고).

리프터 설치구간을 결정할 때는 물리적인 물질 혼합, 고체입자의 흐름, 더스트 발생 최소화, 리프터 금속의 고온 노출방지 등을 고려해야 한다. 이를 위해 시스템 길이방향으로 리프터가 있는 구간과 없는 구간이 차례로 이어져 있고, 존재하는 구간 사이에는 그 배열이 지그재그 형태로 있을 필요가 있다. 그래서 본 모형에서는 화염으로부터 약 50m 거리를 둔 대류 지배구역에 리프터 설치를 적용하였다. Fig. 6은 리프터 설치와 그 구간에 근거한 온도분포를 보여준다[16]. 현재는 한 예로써 배가스 온도 300°C를 목적으로 1m 간격으로 15m 설치 시 결과를 보여준다. 목적 온도와 반응기 내에서 사용되는 물질들의 유량, 열용량에 따라 분포는 차이를 보일 수 있지만 본 모형에 의해 각 경우에 대한 추세를 예측할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 BK21사업단의 지원을 받았습니니다.

## 참고 문헌

- [1] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, "Fundamentals of heat and mass transfer 6th edition", John Wiley & Sons.
- [2] A.A. Boateng, "Rotary kilns: Transport phenomena and transport processes", Elsevier.
- [3] S.Q. Li, Y. Choi, R.D. Li, J.H. Yan, K.F. Cen, "Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: Part II. Theoretical and optimal analyses", Powder Technology, Vol. 126, 2002, pp. 228-240.
- [4] H. Hirose, "Influence of particles falling from flights on volumetric heat transfer coefficient in rotary dryers and coolers", Powder Technology, Vol. 59, 1989, pp. 125-128.
- [5] S.M. Savaresi, R.R. Bitmead, R. Peirce, "On modeling and control of a rotary sugar dryer", Control Engineering Practice, Vol. 9, 2001, pp. 249-266.
- [6] D. Revol, C.L. Briens, J.M. Chabagno, "The design of flights in rotary kiln", Powder Technology, Vol. 121, 2001, pp. 230-238.
- [7] D.R. Van Puyvelde, "Modelling the hold up of lifters in rotary dryers", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 87, 2009, pp. 226-232.
- [8] O.O. Ajayi, M.E. Sheehan, "Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers", Powder Technology, Vol. 223, 2012, pp. 123-130.
- [9] O.O. Ajayi, M.E. Sheehan, "Design loading of free flowing and cohesive solids in flighted rotary dryers", Chemical Engineering Science, Vol. 73, 2012, pp. 400-411.
- [10] M.E. Sheehan, P.F. Britton, P.A. Schneider, "A model for solids transport in flighted rotary dryers based on physical considerations", Chemical Engineering Science, Vol. 60, 2005, pp. 4171-4182.
- [11] K.E. Peray, "The rotary cement kiln 2nd edition", Chemical Publishing.
- [12] A.A. Boateng, P.V. Barr, "A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 39, 1996, pp. 2131-2147.
- [13] J.P. Gorog, T.N. Adams, J.K. Brimacombe, "Heat transfer from flames in a rotary kiln", Metallurgical Transactions B, Vol. 14B, 1983, pp. 411-424.
- [14] P.V. Barr, J.K. Brimacombe, A.P. Watkinson, "A heat transfer model for the rotary kiln: Part I. Pilot kiln trials", Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, 1989, pp. 391-402.
- [15] P.V. Barr, J.K. Brimacombe, A.P. Watkinson, "A heat transfer model for the rotary kiln: Part II. Development of the cross-section model", Metallurgical Transactions B, Vol. 20B, 1989, pp. 403-419.
- [16] H. Lee, S. Choi, "Lifter design for enhanced heat transfer in a rotary kiln reactor", Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, in press.
- [17] A.P. Watkinson, J.K. Brimacombe, "Heat transfer in a direct fired rotary kiln: II. Heat flow results and their interpretation", Metallurgical Transactions B, Vol. 9B, 1978, pp. 209-219.