

# 석탄의 고품위화를 위한 로터리킬른 건조기와 기류건조기의 성능 비교평가

엄태규\* · 최상민\*

## Performance Evaluation of a Rotary Kiln Dryer and a Flash Dryer for Upgrading Low Rank Coal

Taegyue Eom\*, Sangmin. Choi\*

저등급 석탄(Low Rank Coal)은 과거에는 사용되지 않았지만, 석탄 가격상승에 따른 발전용 에너지 위기 때문에 주목을 받고 있다. 저등급 석탄은 가격이 일반 석탄에 비해 낮지만, 수분이 많고 불안정하여 사용하기 어렵다.

따라서 저등급 석탄을 고품위화(건조, 안정화)하는 기술들이 전 세계적으로 개발되고 있으며, 석탄 수분 증발 공정의 위치에 따라 두 가지로 분류할 수 있다. Figure 1처럼 수분 증발 공정 위치를 석탄의 수입 전과 후로 분류할 수 있으며 각각 단광법(briquetting) 그리고 석탄 건조(coal drying)라고 부르고 있다. 단광법에는 일본의 유중 건조방식을 이용한 UBC(Upgrading Brown Coal, 호주의 기류건조 방식을 이용한 BCB(Binderless Coal Briquettes) 등이 상업화에 근접해있다. BCB의 경우, 수분 함량 및 발열량이 29.74wt%, 4,270kcal/kg인 저등급 석탄을 최대 6.19wt%로 건조하여 발열량을 5,900kcal/kg까지 약 40%의 발열량 증가를 확인한 연구 결과도 있다 [1].

본 연구는 건조 공정 위치를 기류건조기가 사용되는 BCB의 경우처럼 수입 전으로 가정하였다. 건조기 종류 선택에서는 온도, 유량 및 체류시간 등의 고려사항들이 있으며 다양한 반응기들이 존재하고 있다 [2].

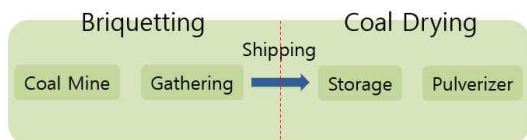


Figure 1 Classification of upgrading low rank coal

다양한 반응기 중, 건조 공정 적용 반응기로 운전비가 가장 저렴한 기류건조기와 수분 증발에 전형적으로 쓰이는 로터리 킬른 건조기를 설정하였다. 그리고 두 반응기 경우의 초기 개념 설계를 진행하는데 고려할 사항들을 정리하였다.

먼저 로터리 킬른 건조(Rotary Kiln Drying)는 투입 고체의 종류 및 처리목적에 따라 유연하게 운전이 가능한 장점을 갖고 있지만, 일반적으로 열효율이 낮다는 단점이 있다 [3]. 로터리 킬른 건조기의 경우 효율적인 열전달을 위해 역류식으로 사용되는 것이 일반적이며 기체-고체 접촉에서 기류건조기보다 불리함을 가지고 있다.

이를 극복하기 위해 Figure 2처럼 열효율 증진 목적으로 리프터 등이 설치되어 있다. 또한, 기체층과 고체층이 분리되어 있기 때문에 건조 반응이 일부 국한적인 부분에서만 일어날 것으로 예상할 수 있다. 그리고 역류식 열교환 특성으로 인해 길이 방향으로 진행할수록 높은 온도의 기체로부터 더 많은 열을 전달받을 수 있으며 수분 증발 속도 역시 점차 증가하는 특성을 보일 것으로 예상할 수 있다.

다음으로 기류건조(Flash Drying)는 고체 대비 사용 기체 질량비가 크기 때문에 고체 처리량을 클 경우 반응기의 크기가 커지는 단점을 가지고 있다. 또한, 투입 기체의 온도가 상대적으로 낮고 빠른 이송속도로 인하여 체류시간이 수 초 단위로 짧아서 온도 상승에 민감한 고체 입자 건조에 장점이 있다. 특히 고체 입자 표면 수분 증발에 효과적이다. Figure 3과 같이 고온의 가스와 고체 입자가 같은 방향을 이동(향류식)하며 직접적인 접촉을 통하여 건조가 진행된다.

따라서 기체-고체의 접촉 면적이 높으며 모든 고체 입자에서 수분 증발 반응이 발생할 수 있다. 하지만 향류식 열교환 특성으로 인해 길이 방향으로 진행함에 따라 기체-고체 간 온도차이가 작아지게 되고, 열 전달량이 감소하게 되며 수분

\* KAIST 기계공학과

† 연락저자, [smchoi@kaist.ac.kr](mailto:smchoi@kaist.ac.kr)

TEL : (042)350-3070 FAX : (042)-350-3199

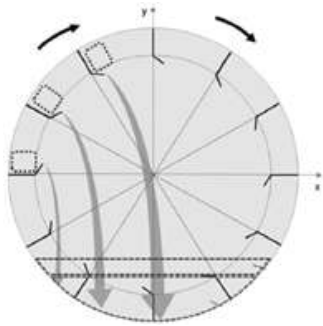


Figure 2 Motion of solid particles in rotary kiln reactors with lifter [4]

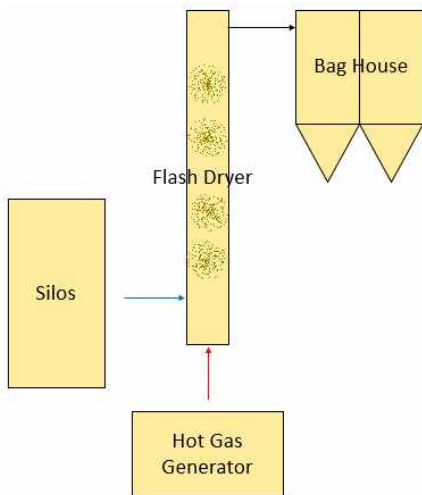


Figure 3 Flash dryer flow description

Table 1 Characteristics of each reactor

	Rotary Dryer	Flash Dryer
$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	100 ~ 2,000 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$ ↓
$u$ (m/s)	1 ~ 5	10 ~ 20
$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	800 ~ 1,100	100 ~ 600
$\tau$ (time)	~ 2hr	5s

증발을 또한 감소하는 특성을 보일 것으로 예상할 수 있다. 앞서 기술한 것 외의 일반적인 각 건조기의 일반적인 운전 특성을 Table 1에서 확인할 수 있다.

두 반응기의 초기 개념설계 방법을 정리하기 위하여 Table 3과 같이 가상의 500MWe 발전소에 필요한 석탄량을 처리하기 위한 경우를 가정하였다. 초기 개념설계는 Figure 4처럼 입구 및 출구 조건의 정립을 통한 0-차원 열·물질 정산을 통한 필요 열량 및 유량 계산이 필요하며 이를 통한 반응기 치수를 고려하는 것 또한 포함된다.

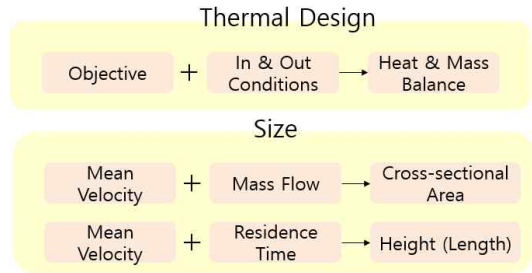


Figure 4 Preliminary engineering calculation

Table 2 Properties of coal [1]

Coal Name	Meng Tai
Ultimate Analysis (wt%)	
Moisture	29.74
Volatile Matter	27.83
Ash	10.51
Fixed Carbon	31.92
Heating Value (kcal/kg)	
Wet Coal (Moist: 29.74%)	4,270
Dried Coal (Moist: 10.00%)	5,495

Table 3 Assumptions for calculation

Capacity (MWe)	500
Required Coal (Mt/year)	2.0

두 반응기의 건조기 성능은 수분 함량 30% 석탄을 10%로 줄이는 것을 목표로 하였다. 또한, Table 3에서는 계산에 사용한 석탄의 특성을 정리하였으며 Meng Tai 석탄을 참고하였다 [1].

먼저, 반응기의 개념설계의 첫 단계는 0-차원 열·물질 정산을 통한 에너지 출입량 검토이다. 따라서 반응기의 입·출구에서 기체 및 고체 온도가 필요하며 이를 토대로 필요 기체량을 계산할 수 있다. 상대적으로 로터리 킬른은 기류건조기의 경우보다 높은 온도의 기체가 투입되며 열전달 효율이 높지 않아 배기가스 또한 높은 온도로 배출된다. 로터리 킬른 반응기의 경우  $N_t$  (Number of heat transfer unit)을 통해 적절한 출구 온도의 범위를 예상할 수 있으며  $N_t$ 의 정의는 아래와 같다.

$$N_t = (T_1 - T_2) / (\Delta T)_m \quad (1)$$

$T_1$ 은 기체의 입구 온도,  $T_2$ 는 기체의 출구 온도 그리고  $(\Delta T)_m$ 은 기체측 입구-출구 온도와 고체측 입구-출구 온도차이의 평균이다. 로터리 킬른의  $N_t$ 의 경우는 1.5에서 2.5의 값을 갖

는 것이 일반적이다 [5].

플래시 드라이어의 경우 입구 온도와 출구 온도와 관계는 석탄 건조 파일럿 실험 [1]과 P.V.C 건조 대용량 실험 [6]의 조건을 참고하였다.

타당한 입구 및 온도 조건을 정하였다면, 건조 목표치에 필요한 열량을 계산한 후, 기체의 입구 및 출구의 엔탈피 차이를 고려하여 필요 기체 유량을 계산할 수 있다.

0차원 열·물질 정산을 통하여 투입되는 에너지 및 유량을 계산하였다면, 계산결과를 토대로 대략적인 반응기의 크기를 예측할 수 있다. 반응기의 크기를 예측하는 데 있어 두 반응기의 타당한 속도를 정하는 것이 필요하다.

두 반응기의 특성 때문에 기체 유속의 제한 조건은 서로 다르다. 로터리 킬른 건조기에서 기체의 속도가 너무 높을 경우, 고체 입자의 비산이 일어나 반응기의 성능을 낮출 뿐 아니라 운전의 불안정성을 가져올 수 있다. 반면 기류건조기에서는 고체의 비산을 기본적으로 포함하는 과정이기 때문에 오히려 속도가 느릴 경우, 고체 입자의 비산이 발생하지 않아 성능이 낮아질 수 있는 위험이 있다. 일반적으로 Table 1에서 두 반응기에서의 기체 속도가 10배 이상 나는 것을 확인할 수 있다.

따라서 각 반응기의 적절한 유속을 정하는 것이 선행되어야 하며 반응기의 단면적은 유속과 질량 유량의 관계를 통해 예측할 수 있다.

$$A = \dot{m} / (\rho V) \quad (2)$$

로터리 킬른 반응기에서의 기체가 진행할 수 있는 단면적은 고체 차지 비율을 제외한 면적을 기준으로 계산하여야 하며, 기류건조기의 경우는 고체가 흩뿌려져 있고 기체의 질량비가 크기 때문에 기체가 진행할 수 있는 면적을 단면적 전체 기준으로 계산할 수 있다.

반응기의 높이(길이)는 기체의 평균 이송 속도와 필요 체류시간의 곱을 통해 계산할 수 있다.

$$H(L) = V \times \tau \quad (2)$$

로터리 킬른 건조기의 경우 상대적으로 낮은 고체와 기체의 이송속도 및 열전달 효과로 인해 공정 목표치 도달까지의 시간이 더디며, 30분에서 1시간 정도로 운영되는 것이 일반적이다. 반면, 기류건조기의 경우 높은 유속 및 열전달효과로 인해 체류시간이 매우 짧으며 수초 단위에 공정 목표치까지 도달할 수 있는 것이 일반적이다. 따라서 적절한 공정 체류 시간 예측이 필요하다.

**Table 6** Results of preliminary engineering calculation

30% → 10%	Rotary Kiln	Flash Dryer
Gas t/h	190	400
Temp. °C	1,000→200	450→100
kcal/kg-solid	240	201
kJ/kg-water	4,330	3,660

로터리 킬른 건조기 및 기류건조기의 기초적인 치수를 제안하기 전, 열·물질 정산을 진행하였으며 Table 6에 결과를 정리하였다. 수분 증발에 필요한 투입열량(kJ/kg-water)을 살펴보면 로터리 킬른 건조기 대비 기류건조기에서 약 15% 낮은 열량이 투입됨을 계산할 수 있었다. 하지만 수직으로 설치되는 기류건조기의 특성상 높은 속도의 기체 유입에 필요한 동력 등 추가 비용 발생 또한 고려하는 것이 필요하다.

저등급 석탄 건조에 사용되는 반응기 중, 일반적인 로터리 킬른 건조기와 기류건조기를 적용하여 0차원 성능평가를 진행하였으며 기본적인 반응기 치수를 예측할 방법 또한 정리할 수 있었다. 기본적인 계산을 통해 반응기 설계의 기초적인 기준을 확립할 수 있었으며 타당한 반응기의 입·출구 조건 재정립 및 재계산을 통해 0차원 계산의 정확도를 높여갈 수 있으며 반응기의 치수 또한 예측할 수 있을 것이다. 또한, 1차원 성능평가를 진행하기 위한 기초 단계로 생각할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 BK21 플러스의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] 김상도, 이시훈, 임영준, 최호경, 임정환, 전동혁, 유지호, "기류건조기를 이용한 고수분 석탄의 건조특성", 한국화학공학회, Vol. 50, No. 1, February, 2012, pp. 106-111.
- [2] G J de Korte, S J Mangena, "Thermal Drying of Fine and Ultra-fine Coal", COALTECH 2020, Report No. 2004 - 0255, 2004, pp. 8-9
- [3] 엄민재, 한택진, 이후경, 최상민 "로터리킬른 반응기 설계를 위한 성능해석 모형", 한국연소학회지, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 9 - 23.
- [4] Lee, H. and Choi, S., "Lifter design for enhanced heat transfer in a rotary kiln reactor", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 27, 2013, pp. 3191-3197

[5] Arun S. Mujumdar, "Handbook of Industrial Drying", 3<sup>rd</sup> ed., Taylor & Francis Group, 2006, pp. 182-185

[6] J. Baeyens, D. Van Gauwbergen, I. Vinckier, "Pneumatic drying: the use of large-scale experimental data in a design procedure", Powder Technology, Vol. 83, 1995, pp. 139-148.