

# 고체 물질의 고온 처리 공정에 관한 에너지 평가 연구

하대승\* · 최상민\*\*

## Energy Evaluation Studies on Pyroprocessing of Solids

Daeseung Ha\*, Sangmin Choi\*\*

### ABSTRACT

Pyroprocessing (or pyrometallurgy) is the way of extracting from materials subjected to high temperatures. Generally, this process has a high energy consumption because of mass production and heating-up. To attain effective and efficient energy management, energetic analysis using 0-dimensional model is usually conducted. However, this model can lead to a misunderstanding about energy evaluation due to many assumptions and limitations. In this study, heat & mass balance using 0-dimensional model was reviewed to systematize problems and considerations in general process energy evaluation.

**Key Words** : Pyroprocessing, 0-Dimensional model, Process energy evaluation

파이로프로세싱(pyroprocessing) 혹은 고온 건식 약금법(pyrometallurgy)는 광물을 추출하는 방법으로써, 고온의 열을 가하여 광석을 변형시키는 것이 특징이다. 일반적으로 광물을 추출하는 과정은 원광(raw ore)의 표면에 부착된 수분을 제거하기 위해 건조시키는 작업이 먼저 수행되며, 고온(500~900℃)의 열을 가해 광석을 열 변형시키는 소성 및 환원 배소, 그리고 광물을 녹여 성분을 추출하게 되는 용융으로 이루어져 있다. 이런 고체 입자들을 처리하는 산업은 규모의 대형화로 고체 입자 처리량이 많으며, 이를 가열하여 건조, 소성 및 환원 배소 그리고 용융 과정을 거치기 위해서는 많은 에너지를 필요로 하게 된다. 이는 에너지 비용 및 환경 문제와 직결되기 때문에 에너지에 대한 관심도가 높으며, 에너지를 수치적으로 표현하고 해석하려고 시도한다. 일반적으로 단순한 열역학적 계산인 열·물질 정산을 수행하여 공정 에너지를 수치화한다.

공정 에너지 계산은 0차원적인 형태로 가정하여 열·물질 정산을 수행하며, 다른 고차원적인 계산에 비해 간단하며 공정 내 복잡한 변수들을 단순화시켜 전반적인 에너지 흐름을 빠르게 판단하고 시스템 해석의 이해를 도와주는데 유용하다. 또한, 0차원적 계산을 통한 에너지 결과는 에너

지 기본 설계에 대한 지침이 되므로 상세 설계의 초석이 된다. 하지만 0차원적인 해석은 많은 변수들을 단순화 및 가정하기 때문에 각 장치의 성능 해석 및 상세 정보 파악에는 한계가 있다. 따라서 이에 대한 문제점과 한계점을 정확하게 파악하지 못한다면 0차원적인 계산을 통한 해석에 어려움이 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 고체 물질의 고온 처리 과정이 포함된 공정에 대해 일반적인 공정 에너지 해석 및 평가 방법을 소개하고 문제점 및 고려사항들을 체계화 하는 것이다.

본 연구에서는 실 규모의 니켈 제련 공정을 대상으로 하였으며, Fig.1과 같이 단순화 된 공정으로, 표현할 수 있다[1].

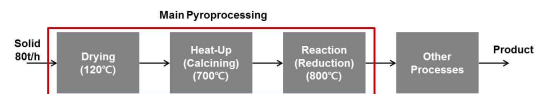


Fig. 1 Schematic diagram of the general metal process.

한편, 공정을 평가하는 방법은 여러 방법이 있으나, 그 중에서 산업에서 이용되는 절차를 표현하면 Fig.2와 같다. 평가 절차는 공정 시스템의 구성을 확인하고 각각의 단위 공정 별로 열·물질 정산을 수행한다. 계산된 에너지 값을 이용하여 정량화(지표화)한다. 공정의 에너지 적절성을 판단하기 위해 유사 생산 공정과의 에너지 비교를 통해 평가할 수 있으며, 이를 통해 단위 공정별 점검이

\* 한국과학기술원 기계공학과

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

TEL : (042)350-3030 FAX : (042)-350-3210

이루어지고 에너지 개선 방향을 이끌어낼 수 있다.

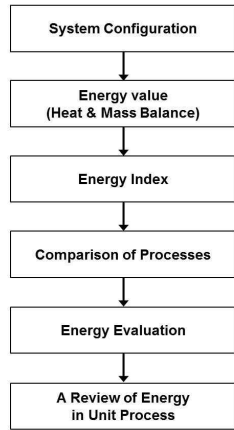


Fig. 2 General process energy evaluation.

Fig.1과 같은 시스템 구성에서, 주 고온 건식 공정인 건조, 승온(소성), 반응(환원) 공정에 대해 Fig.3의 형태로 각 단위 공정(unit process)의 열·물질 정산을 통해 에너지 계산을 수행할 수 있다[2]. 계산의 단순화를 위해 공정의 연속성을 고려하지 않았기 때문에 공정 간 열 손실을 제외한 부분을 이해하고 있어야 한다.

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\sum \dot{Q}_{in} + \sum \dot{Q}_{source} + \sum \dot{Q}_{reaction} - \sum \dot{Q}_{loss} = \sum \dot{Q}_{out} \quad (2)$$

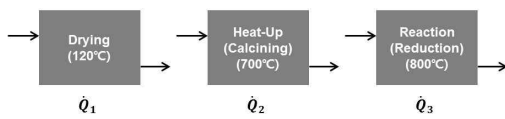


Fig. 3 Energy calculation in unit process.

에너지를 정량화 혹은 지표화 하는 것은 다음과 같이 단순 에너지 투입량으로 표현할 수 있으며 각 성분의 엔탈피 차이를 통해 계산될 수 있다.

$$\dot{Q}_i = \sum \dot{Q}_{i,j} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{i,j} = \dot{m}_{i,j}(h_j - h_{ref}) \quad (4)$$

*i*: unit process

*j*: mass flow component

*h*: enthalpy

0차원적 모형으로 계산을 하였기 때문에 반응기

내부 성능에 대한 파악이 어렵고, 기준 온도 ( $T_{ref}$ )를 어떻게 설정하느냐에 따라 에너지 값에 영향을 주게 된다. 또한 질량유량과 엔탈피 차이의 곱으로 열량이 표현되기 때문에 해석 시 온도에 대해 간과하기 쉽다. 따라서 위의 사항들에 대해 에너지 값 해석 시 참작해야 한다.

단위 공정의 에너지 계산 값을 전체 공정에 대해 표현하기 위해 다음 식(5)와 같이 단위 공정 에너지의 합으로 계산할 수 있으며 수치적으로 단순히 평가할 수 있는 지표가 될 수 있다. 하지만, 투입되는 열원과 광석의 상태가 공정마다 다른 점을 인지하고 평가해야 한다.

$$\dot{Q}_i \rightarrow \sum \dot{Q}_i \quad (5)$$

또한 서로 규모가 다른 유사 공정과의 비교를 통해 에너지 적절성을 판단하기 위해서는 비교 가능한 기준 지표를 설정해 주어야 한다. 식(6)과 같이 광석처리량 당 에너지(좌항), 최종생산품 당 에너지(우항)로 지표화 할 수 있는 방법이 있다.

$$\frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_{i,ore}} \rightarrow \frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_{product}} \quad (6)$$

광석처리량 당 에너지의 경우는 공정마다 광석 상태가 달라지기 때문에 개별 공정 간 비교에는 적용할 수 있으나 전체 공정 간 비교에서는 적용하기 어렵다. 일반적으로 최종생산품 당 에너지의 형태로 전체 공정을 비교하여 평가하는 방법이 많이 이용된다.

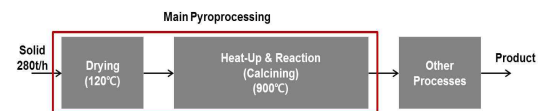


Fig. 4 Schematic diagram of similar process.

이 두 지표들을 활용할 때 주의할 점은 공정 초기 투입 조건을 고려해야 한다. 고체 물질을 처리할 때 에너지 소모가 가장 큰 부분은 수분 증발이다. 초기 물질의 함수율이 높을수록 에너지 소모뿐만 아니라 투입 물질량도 많아지게 된다. 또한, 고체 물질의 품질에 따라 동일 생산량 대비 고체 물질 처리량이 달라지므로 이런 사항을 고려하면서 비교해야 한다.

Fig.5는 최종생산품 당 에너지의 형태로 대상 공정(Process A)과 대상과 유사한 공정(Process B)을 나타낸 그림이다. 고체 투입량과 생산량이 Process B가 훨씬 많으나 최종생산품 당 에너지 기준으로는 훨씬 적은 것으로 표현되고 있다. 일반적으로 Fig.5처럼 초기 물질의 조건에 대해 표

현되어 있지 않기 때문에 에너지 해석 시 간과하기 쉬우므로 조심해야 한다.

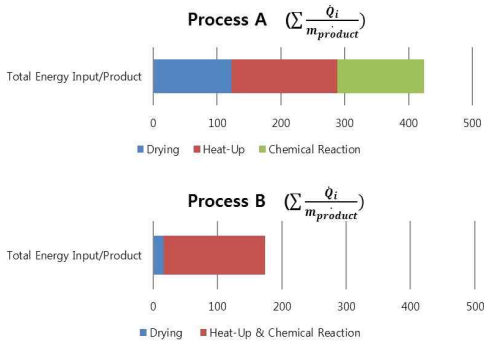


Fig. 5 Comparison of processes using energy index.

유사 공정과의 에너지 비교를 통해 전체 공정 에너지의 적절성에 대한 평가를 수행한 후, 단위 공정의 에너지 사용량(배출량)의 관점에서 어떤 부분에서 에너지 사용이 많았는지 검토해야 한다.

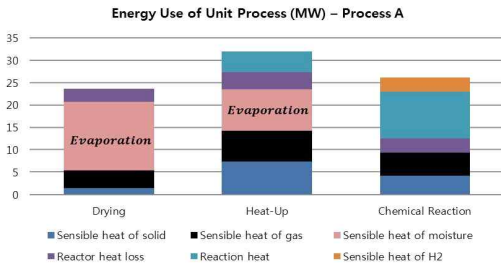


Fig. 6 Energy use of unit process.

Fig.6에서는 주로 수분 증발에 에너지가 사용되는 것을 확인할 수 있다.

단위 공정 별 에너지 적절성 평가를 위해서 광석처리량 당 에너지( $q_{used}$ )를 통해 점검할 수 있으며, 에너지 소모율(energy consumption ratio)을 설정하여 공정 간 비교가 가능하다.

$$q_{used} = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{m}_{i,ore}} \quad (kJ/kg) \quad (7)$$

$$\text{Energy consumption ratio} = \frac{q_{used} \quad (kJ/kg)}{q_{required} \quad (kJ/kg)} \quad (8)$$

여기서  $q_{required}$ 은 공정 목적에 요구되는 에너지로써, 건조의 경우 수분 제거가 목적이기 때문에 단위 질량 당 수분 증발 에너지가 기준이 되며, 승온(소성)의 경우 남은 수분 제거 및 고체

승온이 목적이므로, 단위 질량 당 수분 증발 및 고체 승온 에너지로 기준이 된다. 이를 통해 요구 에너지 당 실 투입 에너지를 비교할 수 있다. 실제 열 손실 및 반응기 성능으로 인해 요구 열량과 같아지기는 어렵다.

단위 공정 에너지 평가 후 에너지 개선을 위한 방법을 모색하며, 주로 대체 반응기를 고려하는 방법과 에너지 재활용하는 방법이 고려된다.

대체 공정의 경우 에너지 관점에서 해석하기 위해서는 에너지 소모율로 평가하는 것이 적합한 방법이다. 에너지 재활용의 경우 열량과 열원의 온도를 동시에 고려해야 한다. 또한, 초기 계산의 편의를 위해 고려하지 않았던 공정 간 에너지 손실의 경우도 포함시켜야 한다. 장치 성능에 따라 다른 결과를 도출하게 되지만 0차원적인 접근 방법에서는 장치 성능을 파악할 수 없으나 개략적인 에너지 개선 방향에 대한 검토를 가능하게 해준다.

0차원 열·물질 정산으로 지금까지 소개했던 에너지 평가를 진행할 수 있었으며, 평가 시 각 단계의 한계점과 고려사항들을 인지하고 파악한다면 공정 에너지 평가 시 에너지 수치 해석에서 혼동하는 경우를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 추후 연구에서 본 연구에서 고려하지 않은 엑서지 검토, 장치 상세 설계(모델링)를 통해 초기 설계의 타당성과 성능을 평가하여 고려 사항들을 체계화 한다면 공정 에너지 평가를 위한 참고 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 BK21 플러스의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] G. Kabir, A.I. Abubakar, U.A. El-Nafaty, "Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant", Energy, Vol. 35, 2010, pp. 1237-1243.
- [2] M. Eom, T. Hahn, H. Lee, S. Choi., "Performance Analysis Modeling for Design of Rotary Kilns Reactors", J. Korean Soc. Combust., Vol. 18, 2013, pp. 9-23.