

제강슬래그 처리 및 재활용의 최적화를 위한 분쇄 특성에 관한 연구

구성은 · 황경진 · 김동수

이화여자대학교 환경공학과

(2000년 2월 17일 접수, 2000년 3월 24일 채택)

The Study of Milling Properties for Optimization of Treatment and Recycling of Converter Slag

Sung-Eun Kuh · Kyoung-Jin Hwang · Dong-Su Kim

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

ABSTRACT

To treat and recycle a large quantity of converter slag, the milling properties of -14/+24 mesh-sized slag has been considered. The optimal conditions in milling process were investigated for producing powder-type slag and the required consumption was derived for the economical grinding. The characteristics of milling processes were studied in the variation of the rotational speed, milling time, filling ratio of ball, and size and amount of feed. The grinding efficiency was also examined. The optimal rotational speed in this experimental condition was observed to be the value of 79% of critical speed. The extent of grinding was increased with increasing the grinding time, but the efficiency of milling was decreased with the time. 50% ball filling was shown to have the optimal grinding effect, and less amount and small-sized feed made the milling efficiency high. As the result, using Bond's equation, power required for efficient milling was considered and the highest value was observed in the condition of high grinding time and optimal rotational speed.

Key Words : Converter Slag, Milling, Critical Speed, Bond's Equation, Work Index

요약문

산업 폐기물 중 다량으로 발생하는 제강슬래그의 재활용을 위하여 -14/+24mesh 정도 크기의 슬래그를 미분말로 분쇄시 최적 조건을 조사하고 경제적인 분쇄조건을 확립하기 위하여 요구되는 동력을 산출하였다. 이를 위한 분쇄조건으로 ball mill의 회전속도, 분쇄시간, ball의 충전량, 시료의 충전량과 크기 등을 선정하였고 이에 대한 분쇄효율을 산출하였다. 본 연구에서는 임계회전속도의 79% 정도에 해당되는 값이 최적의 회전속도인 것으로 조사되었다. 분쇄시간에 따른 분쇄정도는 일반적으로 시간이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났지만 분쇄 초기에 비해 분쇄가 더 진행될수록 분쇄효율은 감소하는 것으로 나타났다. Ball의 충전율은 mill내부 용량의 50%인 경우에 최적의 분쇄효율을 보였고, 시료의 충전량과 크기에 따른 입도조사 실험에서는 시료의 충전량이 적고 원시료의 크기가 작을수록 분쇄정도는 증가하였다. 위의 결과에 의해 Bond의 식을 사용하여 동력효율을 계산한 결과 분쇄시간이 길수록 그리고 회전속도가 최적인 조건에서 동력효율이 가장 크게 나타나고 있음이 관찰되었다.

주제어 : 제강슬래그, 분쇄, 임계회전속도, Bond 식, 일상수

1. 서론

제강공정에서 발생하는 폐기물 중 양적으로 가장 많이 배출되는 것은 슬래그인데 그 발생량이 연간 약 1200만톤에 이른다. 슬래그는 크게 고로슬래그와 제강슬래그의 두 가지로 구별될 수 있는데, 고로슬래그의 경우에는 거의 대부분의 양이 활용되고 있으나 제강슬래그는 그렇지 못한 실정이다. 제강슬래그는 선철을 강철로 만들 때 발생하는 부산물로 CaO, SiO₂ 및 철분(Fe, FeO, Fe₂O₃)이 주성분이고, 그밖에 Al₂O₃, MgO, MnO, P₂O₅ 등이 함유되어 있으며, 국내 최대 규모의 제철소인 포항제철의 경우 그 발생량이 연간 380만톤을 상회하고 있다. 포항제철에서 발생하는 제강슬래그의 대부분은 전로슬래그인데, 포항과 광양제철소에서의 제강슬래그 이용정도는 다소 차이를 보이고 있으나 발생량의 약 53% 정도는 매립되고 있는 실정이다. 그런데 매립장 확보가 점차 어려워지고 있어 제강슬래그의 재활용 용도개발이 시급하게 요청되고 있으며, 대량으로 발생하는 제강슬래그를 효율적으로 활용하기 위해서는 대량으로 활용할 수 있는 기술이 개발되어야 하고, 지속적으로 안정적인 처리를 위해서는 보다 다각적인 활용방법을 강구해야 할 것이다. 현재 실시 또는 연구중인 제강슬래그 활용방법으로서 토

목용 골재화, 시멘트 원료 활용, 제철공정 재활용 및 토양개량제 활용 등이 있다.¹⁾ 이 중에서 제강슬래그를 보다 대량으로 활용하기 위해서는 토목용 골재화, 시멘트 원료 활용 및 시멘트화 등의 재활용 기술이 필수적이며 그 용도에 따라 제강슬래그 고유의 특성 때문에 파쇄 및 분쇄에 어려움이 많아 활용을 제약하는 원인이 되고 있어 보다 다각적인 활용을 위해서는 슬래그 미립화 기술의 확보가 선행되어야 한다. 그런데 슬래그 미립화 기술의 적용시 에너지 소비가 커서 경제성을 저해하는 요인으로 작용하고 있다. 그 일례로 시멘트 제조공정에서 동력비가 전 공정비의 약 50%에 해당하며 그 중 대부분이 원료와 clinker의 분쇄에 사용된다. 이 분쇄에 소요되는 에너지량 중 실제 분쇄에 사용되는 에너지는 2~20%이고 나머지는 미립자의 마찰, 입자와 mill 내 벽과의 마찰, 소음, 열, 진동 및 기타 손실로 소모된다. 따라서 최적 분쇄조건을 확립으로 시멘트 시료 분쇄비를 감소시킨다면 원가절감의 효과와 함께 에너지 절약을 도모할 수 있다.²⁾

이러한 기술적인 과제에 첫 번째 당면문제는 당연히 어떠한 분쇄장비를 어떤 방법으로 선정하여 분쇄를 수행할 것이며, 분쇄된 제품은 어떠한 방법으로 비교적 균일한 입도의 입자군으로 분류하고 또 그 입도의 측정은 어느 방법을 선정할 것인가 하는 점

이다. 그러나 분쇄기술은 현재까지도 완전한 이론적 기반이 확립되어 있기보다는 경험을 통하여 축적된 지식에 크게 의존하고 있음을 부인할 수 없다. 따라서 분쇄방법에 있어서 최적의 조건과 효율의 향상을 위한 기초실험으로 국내의 각종 건설원료로 재활용될 수 있는 제강슬래그를 ball mill을 이용하여 분쇄했을 때 여러 변수들의 조건에 따라 분쇄율과 분쇄율에 미치는 상호경향을 고찰하고 이를 체계적으로 기술함으로써 공정설계 및 운영상에 있어 필요한 지침으로 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사용시료의 화학성분 및 입도

현재 철강산업에서 여러 공정을 거쳐 폐기되고 있는 제강슬래그를 이용하여 분쇄특성을 조사하였는데, 본 실험에 사용한 슬래그의 조성은 Table 1과 같다. 사용된 슬래그 시료는 포항제철에서 발생하는 제강슬래그로 ball mill의 분쇄에 적합하도록 crusher를 거쳐 나온 -14/+24 mesh 정도로 크기가 조절된 슬래그를 dry oven에서 미량의 수분을 제거하기 위하여 105℃로 1시간 건조한 후 ball mill에 장입하였다. 원시료의 입도분포는 Fig. 1과 같다.

한편 본 실험에 사용한 슬래그의 압축강도를 press(RIKEN, Model R-303)을 이용하여 측정된 결과 $3.44 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 의 강도를 가지는 것으로 파악되었다.

2.2. 실험장치

2.2.1. 분쇄장치

제강슬래그의 분쇄특성을 조사하기 위하여 rod mill 보다 capacity는 작으나 에너지가 적게 들어

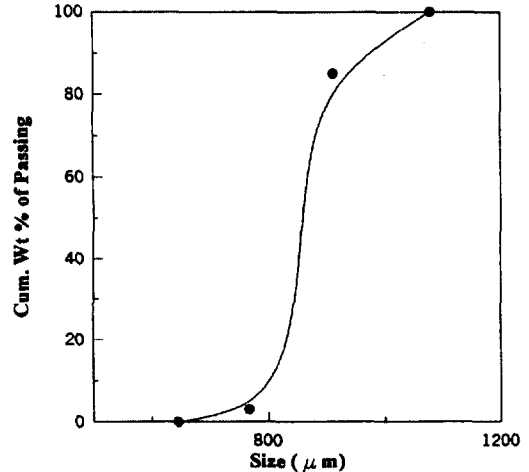


Fig. 1. Particle size distribution of converter slag.

경제적이고 좀더 변수조절에 있어 적합한 tumbling 형태의 ball mill을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 ball mill(AST Co. Korea)의 사양은 다음과 같다.

- 외부길이 : 27cm, 내부길이 : 23cm
- 외부직경 : 24cm Ø, 내부직경 : 22cm Ø
- 내부실용적 : 9.313L
- motor : 220V, DC
- maximum output : 1750kWh
- ball : 30mmØ 구형 자재볼

2.2.2. 입도별 분리장치

분쇄된 슬래그의 입도를 결정하는데는 여러 가지 방법들이 적용될 수 있는데 본 실험에서는 Tyler Standard Method 중 $\sqrt[4]{2}$ series를 이용하여 -14/+400 mesh 사이에서의 입도분포양상을 조사하였다. 또한 입도분포를 측정하기 위한 체분리시표준체 진탕기(sieve shaker, Jeil Co., JI-403)를 사용하여 각 실험당 20분씩 체분리하여 입도별로 분리하였다.

Table 1. The composition of converter slag used in the experiment

	Fe _{total}	CaO	CaO _{free}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	CaF ₂	Cr ₂ O ₃	Total
wt %	15~24	40~50	max.10	10~15	max.2	1~2	3~7	1~3	max. 0.5	max. 0.3	100

2.3. 실험조건

최적의 분쇄조건을 확립하기 위하여 ball mill의 회전속도, 분쇄시간, ball의 충전량, 시료의 충전량에 따른 실험을 각각 수행하였다. Ball mill의 회전속도는 16~162 rpm사이의 값으로 변화시키면서 회전속도에 따른 변화를 관찰하였다. Ball의 충전량 변화실험에서는 30 mm의 구형 자재볼을 사용하여 충전량을 25, 50, 그리고 75%로 각각 변화시켜가면서 측정을 하였는데 충전량을 변수로 사용한 실험을 제외한 모든 실험에서는 tumbling 형태의 ball mill에서 최적의 효율을 나타내는 50% 정도로 ball을 충전시켜 실험하였다. 이때의 ball의 총 무게는 15 kg 정도였다. 시료의 양에 따른 분쇄효과 측정실험에서는 약 0.1 cm 정도로 분쇄된 시료의 장입량을 500~2000 g 범위에서 그 효율을 측정하였다. 시간에 따른 분쇄정도를 측정하는 실험을 제외하고 모든 실험은 분쇄소요시간 10분, 분립소요시간 20분동안 수행되었다. 시간에 대한 분쇄정도를 관찰하는 실험에서는 10~50분간 분쇄를 수행하여 그 변화를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Mill의 회전속도에 따른 분쇄특성

분쇄공정에서 전력손실을 줄이기 위해 회전속도는 매우 중요한데, 회전속도를 16, 43, 77, 110, 그리고 162 rpm으로 변화시키면서 분쇄생성물의 입도분포를 조사한 결과, Fig. 2에 제시되었듯이 중간 단계의 회전속도인 77 rpm에서 분쇄효율이 가장 높고 속도가 16 rpm이나 110 rpm 정도인 경우에는 상대적으로 분쇄율이 감소되고 있음이 관찰되었다. 이는 tumbling ball mill에서 분쇄시 ball의 움직임이 회전속도에 따라 변화되기 때문인 것으로 생각되는데 회전속도가 증가하게 되면 Fig. 3의 (a)에서 (b)를 거쳐 (c)와 같은 형태로 그 운동이 변하게 된다.

Mill이 회전하게 되면 ball은 내벽을 따라 올라가서 mill의 상단 꼭지점에 도달하게 되면 바닥으로 떨어지면서 분쇄가 일어나게 되는데 ball mill의 회

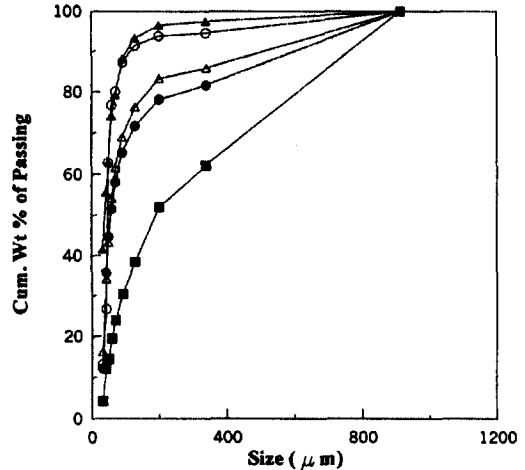


Fig. 2. The variation of cumulative weight % of passing as a function of particle size for differential rotational speed at 16(●), 43(○), 77(▲), 110(△), and 162rpm(■).

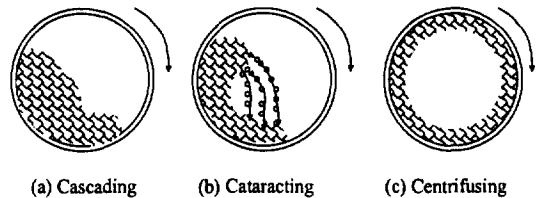


Fig. 3. Motion of grinding media in tumbling ball mill.

전속도가 작을 때는 ball과 슬래그가 함께 올라가다 미끄러지게 되어 마모작용이 주된 분쇄원인으로 작용하지만(Fig. 3(a)), ball mill의 회전속도가 더 증가하게 되면 원심력을 받은 ball이 mill의 내벽을 따라서 움직임없이 mill과 함께 회전하게 되어 분쇄는 일어나지 않게 된다(Fig. 3(c)). 이 때는 mill의 동력소비는 크나 분쇄가 거의 일어나지 않으므로 mill의 내부에서 마모작용과 낙하충격작용이 일어나기에 적당한 회전속도로 운전되어야 한다. 원심력의 작용으로 인해 mill과 함께 ball이 내벽을 따라 회전하기 시작하는 속도를 임계회전속도(N_c , critical speed of ball mill)라고 하는데, mill이 회전시 critical speed(N_c)에서는 중력과 원심력이 평형을 이루게 되므로,³⁾ 중력(식 (1))과 원심력(식 (2))의 크기를 동일하게 설정하면 식 (3)이 성립된다.

$$W = mg \tag{1}$$

$$C = \frac{mv^2}{R} = \frac{m}{R} \left(\frac{2\pi RN}{60} \right)^2 = \frac{m \pi^2 RN^2}{900} \tag{2}$$

$$mg = \frac{m \pi^2 RN_c^2}{900} \tag{3}$$

여기서, C = centrifugal force(lb · ft/sec²), W = gravitational force(lb · ft/sec²), v = peripheral speed of mill (ft/sec), m = mass of grinding ball(lb), N = RPM of mill(rpm), R = radius of mill(ft), g = gravitational acceleration(ft/sec²)을 각각 의미한다. 따라서 critical speed(N_c)는 식 (3)으로부터 식 (4)와 같이 도출되며,

$$N_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{54.2}{\sqrt{R}} = \frac{76.6}{\sqrt{D}} \tag{4}$$

(D: diameter of mill(ft))

ball의 diameter를 고려할 시 식 (4)는 식 (5)로 변형된다.³⁾

$$N_c = \frac{76.6}{\sqrt{D-d_b}} \tag{5}$$

(d_b: diameter of ball mill(ft))

일반적으로 tumbling mill의 운전속도는 보통 N_c의 65~80%가 적당하며, 점성이 큰 현탁액을 습식 분쇄할 때는 건식에 비해 더 낮은 속도로 운전하는 것으로 알려져 있다. 또한 여러 연구에서 제시된 바에 의하면 분쇄효과가 최대가 되는 회전속도는 임계 회전속도의 77% 정도일 때라는 보고가 있는데,⁴⁻⁷⁾ 본 연구의 D = 0.722ft, d_b = 0.098ft인 조건에서 식 (5)를 사용하여 N_c를 계산한 결과 97.02rpm의 값으로 나타났다. Fig. 2의 결과에서 최적의 회전속도인 것으로 보여지는 77rpm은 계산된 critical speed값의 약 79%에 해당되며 문헌에서 조사된 수치에 근접하는 것으로 조사되었다.

3.2. 분쇄시간의 영향

분쇄가 시작되려면 어떤 임계에너지 수준을 초과

해야 분쇄가 일어나게 되므로 분쇄시간은 중요한 영향을 준다. Slag 재활용시 주로 미분말 형태로 이용되는데, 이러한 점을 감안하여 분쇄시간을 10 ~ 50분 사이로 설정하고 각 구간별로 분쇄정도를 측정하여 Fig. 4에 제시하였다. 분쇄시간이 10분에서 점차 증가됨에 따라 slag가 더 미립자로 분쇄되었는데, 분쇄효율의 상승정도가 분쇄소요시간 10분에서 20분으로 넘어가는 경우에 가장 크게 관찰되고 있는 것으로 나타났다. 이는 일정량의 미분말을 분쇄할 경우보다 같은 양의 큰 덩어리를 분쇄시 더 작은 동력이 필요하게 되는 현상으로 설명할 수 있을 것으로 사료된다. 입도의 감소를 일으키는데 필요한 에너지량은 분쇄물의 내부구조와 관련이 있다. 분쇄 공정은 분쇄원료에 이미 있던 구조상의 간격이 열린 다음, 새로운 표면을 형성하는 2단계로 구성되어 있다고 설명할 수 있다. 실제로 분쇄가 일어나는 초기의 덩어리에는 많은 틈새가 있어서 처음에는 이 틈새를 따라서 분쇄가 일어나기 때문에 큰 슬래그는 작은 슬래그보다 더 쉽게 분쇄되어질 수 있다. 또한 분쇄현상을 표면적이 증가하는 측면에서 생각해 본다면 분쇄의 초기단계에 있어서는 날카로운 형태의 분쇄물을 많이 함유하고 있어 상대적으로 충격에너지가 커서 작은 동력으로도 분쇄가 일어나게 된다.⁸⁾

본 실험의 경우 ball mill은 연속적으로 일정한 동

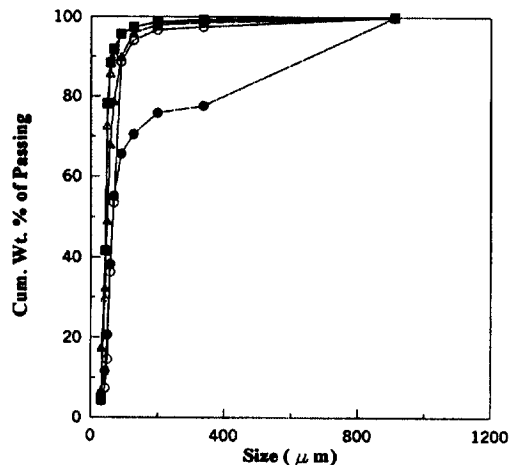


Fig. 4. The variation of cumulative weight % of passing as a function of particle size according to the time at 10(●), 20(○), 30(▲), 40(△), and 50min(■).

력을 제공하므로 시간이 증가함에 비례하여 동력소모량도 증가하게 된다. 10분 또는 20분 정도의 분쇄소요시간에서는(상대적으로 작은 동력을 사용시에는) 비교적 큰 덩어리의 분쇄가 일어나게 되므로 분쇄효율의 증가율이 크다. 그런데 소요시간이 20분에서 30분 등으로 진행됨에 따라 분쇄는 미분쇄의 형태로 전환되게 되고 이로 인해 분쇄를 위한 소요시간과 동력소모량이 증가하게 된다. Fig. 4의 결과는 이러한 경향을 잘 설명해 주고 있다.

3.3. Ball의 충전율별 분쇄특성

Hogg와 Fuerstenau는 분쇄시 media와 분쇄시료의 충전에 따른 분쇄효율의 변화양상을 Fig. 5와 식 (6)에 제시된 동력소비량($P(kwh)$)으로 나타내는 방법을 제안하였다.⁹⁾

$$P = 0.001216 \rho_b N \dot{L} D^{2.5} \sin \beta \sin^3 \theta \quad (6)$$

여기서, ρ_b = density of ball (lb/ft³), N = fraction of N_c , L = length of mill(ft), D = diameter of mill(ft), P_{50} = power consumption at 50% filling(kwh)을 각각 나타낸다. Fig. 6은 위의 Hogg와 Fuerstenau 이론에 의거하여 본 실험에서 ball의 충전율의 변화에 따른 동력소비량 대 50% ball의 충전시 동력소비량비를 나타낸 것이다. Fig. 6에 의하면 ball의 충전율이 0.5일 때 분쇄효율이 가장 증가하는 것으로 나타났고, 그 값에서 멀어질수록 분쇄효율은 감소하는 것으로 파악되었다. 0~0.5의 충전율 범위에서는 ball과 slag가 함께 분쇄시에 ball의 양이 많아지면 상호 간섭하면서 일어나는 마모작용이 커지게 되어 분쇄효율이 증가하게 되는 것으로 사료된다. 반면, 충전율이 50%를 넘어서게 되는 경우에 있어서는 과도한 충전으로 인해 서로 마모작용을 일으킬 수 있는 공간이 줄어들게 되고, ball들이 mill 안에서 운동할 수 있는 공간이 감소되어 내벽에 충돌 후 낙하시 낙하길이가 줄어들어 낙하에너지가 작아지게 된다.¹⁰⁾ 따라서, 이의 결과로 분쇄효율이 감소하게 되는 것으로 생각된다. Fig. 6에서 ball의 충전율에 따른 P/P_{50} 변화양상은 이론적으로 고찰해 볼 때 ball filling이 0.5인 경우

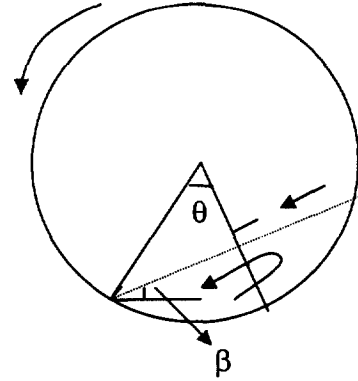


Fig. 5. The formation of crop load in the ball mill(The dotted line means free flight trajectory of crop load).

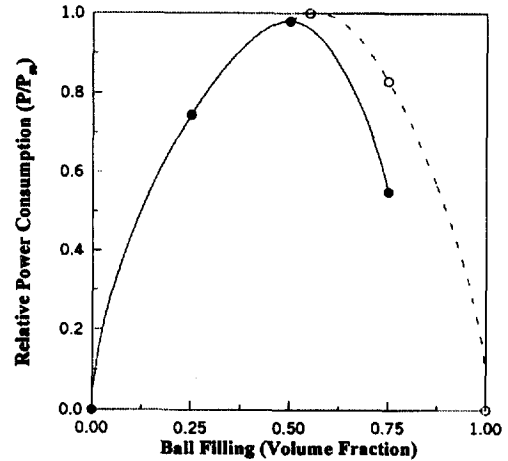


Fig. 6. The relative power consumption (P/P_{50}) in the variation of ball filling.

를 축으로 하여 대칭의 plot을 형성할 것으로 예상되나, 실제로는 0.5이상의 충전율에서 기울기가 더 급하게 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 불과 불 사이에서 power cushioning 현상 등에 의한 충격력의 손실과 입자들이 불과 접촉할 기회를 상실하기 때문에 분쇄작용이 감소하고 그 효과도 줄어들기 때문인데,¹¹⁾ 이러한 요인들은 ball이 적게 충전시 간섭이 줄어들어 분쇄가 악화되는 현상보다 분쇄효과의 감소에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

3.4. 시료의 충전량에 따른 분쇄율의 변화

Fig. 7은 시료의 충전량을 500~2000 g 범위에

서 변화시킨 경우의 입도분포에 따른 체의 통과율을 누적곡선으로 나타낸 것이다. 그 결과 충전량을 500 g에서 점차 증가시키면 상대적으로 크기가 큰 분쇄생성물의 비율이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 시료를 적은 양으로 충전하면 ball에 비해 시료의 양이 적음으로 인하여 입자와 ball이 충돌할 기회가 커지게 되고 이로 인해 분쇄효율이 증가하게 되는 것으로 생각할 수 있다. 그런데 ball이 낙하할 때 그들에 의해 생성되는 에너지 중 많은 부분이 ball들끼리의 충돌에 거의 소모되어지고, 순수하게 ball mill의 분쇄시 사용된 에너지의 개념에서 고찰하여 본다면 분쇄에너지 효율은 줄어들게 된다. 또한 ball이 불필요하게 과잉 마모됨으로 인해 분쇄비용을 증가시키는 요인으로 작용하게 될 수도 있다.¹⁰⁾ 따라서 size reduction과 에너지의 경우 모두를 고려하여 분쇄 충전량을 검토할 필요가 있다. 이 실험의 경우에서 사용된 에너지에 대한 사항은 본 논문의 후반부에서 다루었다.

3.5. 시료의 크기별 분쇄양상

비교적 미세한 입자들을 분쇄하는 ball mill에 투입하는 시료의 크기에 따른 분쇄효율을 조사하기 위하여 시료의 크기를 일반적으로 ball mill 분쇄시 적용되는 크기로 검토되는 0.1, 0.5, 그리고 1.0 cm 등으로 조절하여 각 크기별로 동일한 장입량에 대해 분쇄·비교하였다. 본 실험조건에서 장입슬래그의 크기가 0.1 cm의 경우 분쇄된 슬래그의 입도가 -14/+400 mesh의 범위에서 모든 입자가 분포하고 있는데 반해, 0.5 cm와 1.0 cm의 경우에는 전체 투입량의 약 60%와 20% 정도만이 그 범위안의 값으로 분쇄되는 것으로 나타났다. 동일한 분쇄시간에 대해서는 ball mill에 투입시 분쇄시료의 크기가 가장 작은 것이 더 효과적인 것으로 생각되어질 수 있으나 실제 원시료의 크기에 비해서 분쇄되어진 분쇄효율의 측면에서 생각해보면 시료의 크기가 큰 경우가 더 효과적인 것으로 조사되었다. 이는 앞서 설명한 크기가 큰 분쇄시료가 동일 무게의 크기가 작은 시료에 비해 분쇄효율이 높다는 것과는 연결해서 생각해 볼 수 있을 것이다. 또한 미세한 크기까지 분쇄하기 위한 만큼의 부가적인 동력비 소모가 뒤따르는

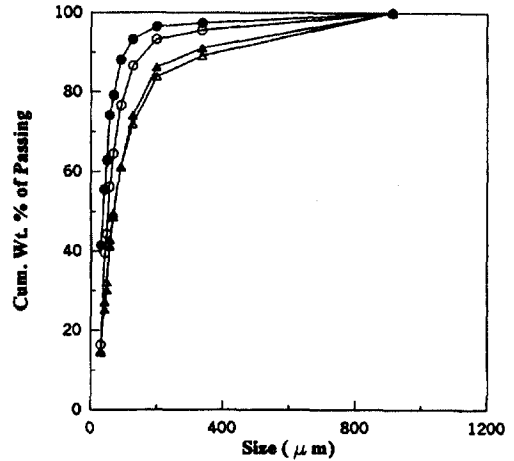


Fig. 7. The variation of cumulative weight % of passing as a function of particle size according to the amount of feed to be 500(●), 1000(○), 1500(▲), and 2000g(△).

것으로 사료되어 분쇄장비와 분쇄조건들에 따른 원시료의 크기가 중요한 요인으로 작용할 것으로 여겨진다.

3.6. 분쇄법칙 - 동력소요모델

실제 분쇄과정에서는 분쇄와 미분쇄에 소요되는 비용 중에 동력비의 비중이 크므로 이를 조정하는 인자가 매우 중요하게 작용하는데, 위에서 실험한 모든 결과들을 바탕으로 본 연구에서 검토한 슬래그 분쇄공정에 대한 동력소요량을 Bond의 식을 적용하여 계산해 보았다. 공업용 분쇄기나 미분쇄기의 동력소요량을 계산하는데 실제적으로 가장 널리 적용되는 Bond의 식(crack length theory, 1952)은 particle size의 변화에 따른 ball mill의 에너지 소비를 나타내는 반경험적인 이론에 입각한 것이다.¹²⁾

먼저 분쇄과정에 소요된 에너지를 물리적인 개념에서 고려해보면, 물체에 부가된 strain energy는 물체 전체의 부피에 평균적으로 동일하게 흡수되므로 한 변의 길이가 x인 물체의 경우에 있어서는 그 물체의 체적(x^3)에 반비례하는 것으로 간주할 수 있다. 그러나 일단 crack tip이 형성되면 stress는 물체의 표면(x^2)를 따라서 흐르게 된다. 따라서 고형

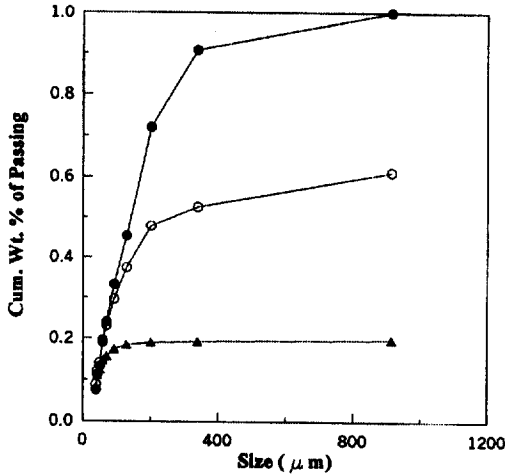


Fig. 8. The variation of cumulative weight % of passing as a function of particle size according to the size of feed to be 0.1(●), 0.5(○), 1.0cm(▲).

물의 단위 무게 (또는 단위 부피)를 분쇄하기 위해서 필요한 일¹³⁾은 다음의 식으로 표현되어질 수 있다.

$$E \propto x^{2.5} / x^3 \propto 1 / \sqrt{x} \quad (7)$$

여기서, x_F = the size of feed(μm), x_P = the size of product(μm)라 놓으면, 어떠한 물질을 x_F 크기에서부터 x_P 크기까지 분쇄하는데 필요한 에너지는 다음과 같다.

$$E = k_b \left(\frac{1}{\sqrt{x_P}} - \frac{1}{\sqrt{x_F}} \right) \quad (8)$$

여기서, k_b = Bond's constant로 알려져 있는 비례 상수로서 분쇄기의 종류와 분쇄원료에 따라 달라지게 된다.

또한, Bond는 work index(W_i)라는 용어를 정의하였는데, W_i 는 물체를 100μm sieve에 80% 누적량이 통과하는 size까지 분쇄하는데 필요한 일(kwh/ton)을 말하며 Bond 상수와는 다음과 같은 관계가 있는 것으로 보고되고 있다.¹³⁾

$$k_b = \sqrt{100 \times 10^{-3}} W_i = 0.3162 W_i \quad (9)$$

위의 관계식들에 의해 다음의 분쇄에너지 관계식이 성립한다.

$$E = \frac{P^*}{m'} = 0.3162 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{p}} - \frac{1}{\sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

여기서, W_i = work index(kwh/ton), f = 80% passing size of feed(μm), p = 80% passing size of product(μm), P^* = power required(kw), 그리고 m' = feed rate(tons/h)를 의미한다. Bond 식은 대부분의 분쇄과정에 속하는 중간단계의 분쇄 공정에 적용가능하다. 그러므로 ball mill이나 rod mill에 있어서 가장 폭넓게 적용가능한 개념으로 간주되고 있으며, 또한 work index(W_i)는 각종 암석과 광물의 분쇄능을 평가하는데 가장 널리 사용되는 방법이다.^{12~15)} 비중이 2.83 정도의 슬래그의 경우 11kwh/ton 정도의 W_i 를 가지는 것으로 보고되었다.⁹⁾ 이에, 비중병을 사용하여 본 실험에서 시료로 사용된 슬래그의 비중을 측정해 본 결과, 그 값이 2.80정도인 것으로 관찰되어 기존의 슬래그의 work index 값으로서 보고된 11kwh/ton을 W_i 로 적용하여 위의 식들에 의해 본 실험 조건에서 ball mill의 에너지 필요량과 동력소요량을 산출하여 Fig. 9와 10에 나타내었다.

여기서 적용된 동력효율 P^* 는 mill에서 ball에 의한 시료의 분쇄에 직접적으로 작용되는 동력을 의미하며 시료의 충전율이 같을 경우에는 분쇄능력과 연결되는 개념으로 생각되어질 수 있다.

먼저 Fig. 9에서는 회전속도에 따른 동력효율을 보여주는데, 회전속도가 43~77 rpm인 경우에 상대적으로 높게 나타났으며 최적의 회전속도인 77 rpm의 경우 동력의 효율이 가장 큰 것으로 나타났다. Ball mill에 의한 분쇄시 rpm이 증가하면 동력소요량(ball mill의 운전시 필요한 전체 동력요구량)은 증가하는데 반해, 동력효율(전체 소요동력에 대한 실제 슬래그 분쇄에 이용된 동력의 비)은 최적의 rpm에서 가장 큰 값을 보인다. 따라서 직접적인 동력비와 연결되는 동력소요량을 줄이고 분쇄효율을 증가시키기 위하여 최적의 rpm에서 운전되는 것이 바람직하다.

Fig. 10은 분쇄시간에 따른 동력효율을 나타낸 것이다. 분쇄시간이 10분에서 점차 증가할수록 동력

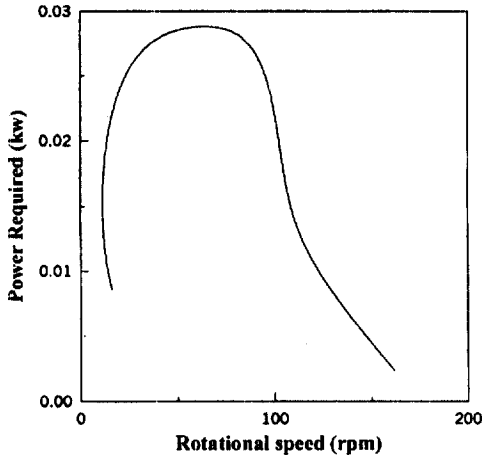


Fig. 9. The variation of power required as a function of rotational speed.

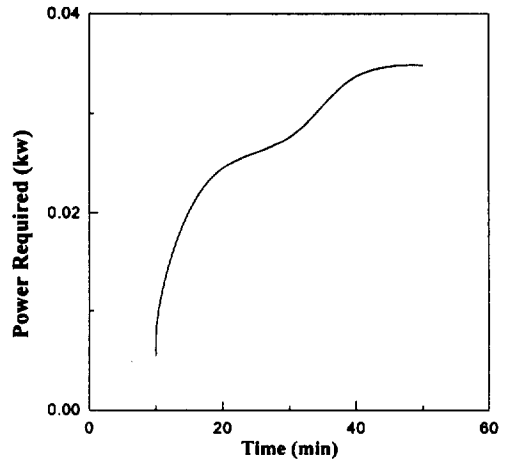


Fig. 10. The variation of power required as a function of time.

효율이 증가하고 있음이 관찰되었는데 그 증가정도는 초기분쇄에서 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 분쇄 초기에 분쇄효율이 더 크기 때문에 10분에서 20분의 분쇄소요시간 사이에 분쇄를 위한 동력효율의 증가 정도가 가장 크고, 그 이상의 분쇄시간에 대해서는 분쇄효율이 점차 줄어들고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 실험의 조건에서 경제적인 측면을 고려해 본다면 목표로 하는 분쇄크기로 분쇄산물이 생성된다는 전제하에 분쇄시간을 줄이는 것이 분쇄능력을 향상시키는 것이라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 제강슬래그의 처리 및 재활용을 위하여 슬래그를 미분말로 분쇄시 분쇄능의 향상을 위한 최적조건을 조사하고 경제적인 분쇄조건을 확립하기 위하여 실험 결과에 의하여 소요되는 동력을 산출하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

- 1) 분쇄공정에서 소요되는 동력을 줄이기 위해 회전속도는 매우 중요한데, 일반적으로 회전속도가 증가할수록 마모작용이 증가하여 분쇄효과가 상승되나 어느 정도 이상의 속도에 이르게 되면 원심력을 받은 ball이 mill의 내벽을 따라서 mill과 함께 돌게되어 분쇄는 일어나지 않게 된다. 본 실험에서는 임계회전속도

의 79% 정도에 해당되는 값이 최적의 회전속도인 것으로 조사되었다.

- 2) 분쇄시간에 따른 분쇄정도를 관찰하기 위하여 시간을 변화시키면서 입도분포정도를 측정 한 결과, 일반적으로 시간이 증가함에 따라 분쇄정도는 더 증가하지만 분쇄 초기에 비해 분쇄가 더 진행될수록 분쇄효율은 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) Ball의 충전율에 따른 분쇄효율 측정 실험에서 ball의 충전율이 0.5 정도일 때 분쇄효율이 가장 증가하는 것으로 나타났고, 그 값에서 멀어질수록 분쇄효율은 감소하였다. 즉 충전율이 작을 경우에는 ball과 시료와의 상호간섭효과가 줄어들기 때문에 효율이 감소하고, 충전율이 너무 커질 경우에는 ball들이 mill 안에서 운동할 수 있는 공간이 감소되어 낙하에너지가 작아지기 때문에 분쇄효과가 저감되는 것으로 사료된다.
- 4) 시료의 충전량이 적고 원시료의 크기가 작을수록 분쇄정도는 증가하는데 이는 ball과 충돌할 기회가 더 증가하기 때문인 것으로 파악되었다. 그러나 시료의 양이 적고 그 크기가 작은 경우 분쇄효과는 좋으나 불필요한 동력낭비 등의 문제를 유발하게 되는 것으로 파악되었다.
- 5) Bond의 식을 사용하여 동력효율을 계산한 결과 분쇄시간이 길수록, 그리고 회전속도가 최적인 조건에서 동력효율이 가장 크게 나타나고

있음이 관찰되었다. 분쇄효율과 함께 연결해서 고려한다면 분쇄시간이 비교적 짧을수록 그리고 최적의 회전속도에서의 경우에 가장 경제적이고 효율적인 분쇄가 이루어지는 것으로 생각되어진다.

기 호 설 명

- N_c : critical speed of ball mill(rpm)
- C : centrifugal force($lb \cdot ft/sec^2$)
- W : gravitational force($lb \cdot ft/sec^2$)
- v : peripheral speed of mill(ft/sec)
- m : mass of grinding ball(lb)
- N : RPM of mill(rpm)
- R : radius of mill(ft)
- D : diameter of mill(ft)
- g : gravitational acceleration(ft/sec^2)
- P : power requirement(kwh)
- ρ_b : density of ball (lb/ft^3)
- N' : fraction of N_c
- L : length of mill(ft)
- d_b : diameter of ball mill(ft)
- P_{50} : power consumption at 50% filling(kwh)
- E : energy(kwh/ton)
- x_F : the size of feed(μm)
- x_P : the size of product(μm)
- k_b : Bond's constant
- W_i : work index(kwh/ton)
- f : 80% passing size of feed(μm)
- p : 80% passing size of product(μm)
- P^* : power required(kw)
- m' : feed rate(tons/h)

참 고 문 헌

1. 심재동, 반봉찬, 금속공학에서의 슬래그, 대광문화사, pp. 381~403(1991).
2. 김병규, 류민수, "Cement clinker 분쇄조제 선택에 관한 연구," 한국화학공학회지, **21**, 245~252(1983).

3. 박창호, 김우식, 정인식, 물질전달 및 분리공정, 지인당, pp. 211~246(1987).
4. McIvor, R. E., Lavalley, M. L., Wood, K. R., Blythe, P. M., and Finch, J. A., "Functional performance characteristics of ball milling," *Mining Engineering*, **42**, 269~276(1990).
5. Wills, B. A., Mineral Processing Technology, Pergamon Press, New York, pp. 184~188(1985).
6. Zhao, Q. Q., Jimbo, G., "The effect of grinding media on the breakage rate in a planetary ball mill," *Adv. Powd. Tech.*, **2**, 91~102(1991).
7. Orumwense, O., "The kinetics of fine grinding in an annular ball mill," *Powder Tech.*, **73**, 101~110(1992).
8. 강석호, 분체공학, 회중당, pp. 153~201(1995).
9. Lowrison, G. C., Crushing and Grinding, Butterworths Pty Ltd., London, pp. 3~66(1974).
10. 심철호, "소형불밀의 조작변수가 규사의 미분쇄에 미치는 경향," 한국자원공학회지, **36**, 463~469(1999).
11. Austin, L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T., Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling, SME AIME, New York, pp. 88~93(1984).
12. Bond, F. C., "Some recent advances in grinding theory and practice," *British Chem. Eng.*, **8**, 631~645(1963).
13. McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriott, P., Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 960~993(1993).
14. Celik, M. S., "A Comparison of dry and wet fine grinding of coals in a ball mill," *Powder Tech.*, **55**, 1~11(1988).
15. Atkins, A. R., and Hinoe, A. L., "Measurement and control of practice size in a milling circuit," *ISA Trans.*, **14**, 318~330(1975).