

해설



광물 분체 제조기술의 발전 동향

정 문 영

세명대학교 자원환경공학과

인류 역사 이래 인간생활과 가장 밀접한 관계를 유지하고 있는 광물은 최근에도 전 산업분야에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 플라스틱, 페인트 및 제지공업 등의 산업분야에서 광물을 충전재 (filler)로 사용하는 이유는 기본적으로 원가의 절감을 위한 것이지만 기능성 향상을 동시에 얻을 수 있다는 부가적인 효과도 있다. 예를 들면, 플라스틱에 활석 분체를 충전하여 엔지니어링 특성을 보강하므로써 ABS와 같은 고가의 플라스틱을 제조하는 용도로서 역할도 하고 있으며, 물성의 개량측면에서도 열적 성질의 개선을 성취하는 등의 효과가 있다. 이외에도 광물의 특성에 따라 가공정도 및 유동성을 조절할 수 있고, 탈형 촉진, 경화시간의 조정, 발포방지 등 다양한 효과를 얻을 수 있다. 그러나 광물이 이처럼 기능성 산업원료로 사용되기 위해서는 미립상태의 일정한 입도분포와 입자형상을 갖추어야만 한다.

분체 제조기술이 산업에서 왜 중요한가를 설명한 연구보고서 (Davis et al. 1994)도 있다. 이 보고서에 의하면, 미국의 다국적 화학기업인 DuPont에서 생산되는 3,000여종의 제품 중에서 종류수를 기준으로 62%가 입자상 물질이고, Dow Chemical 회사의 제품 중 50%는 분립체 물질이라고 한다. 이처럼 여러 산업분야에 이용

되는 분체들은 각각의 용도에 따라 그 크기와 형상이 다르므로 그들의 제조기술 역시 다양하게 발전되어 왔다 (강석호, 2003).

분체의 제조기술은 크게 입자생성기술과 입자축소기술로 대별된다. 입자생성기술 (size enlargement)은 물질구성 원자나 분자수준에서 원하는 크기의 입자를 생성하는 방법이다. 화학적 침강법에 의해 경탄이라고 불리우는 판상구조의 침전성 탄산칼슘 (precipitated calcium carbonate) 제조의 예처럼 일정한 형상을 갖는 고순도 미립자의 입자 제조시 이용되고 있으나 주로 나노크기의 입자 제조에 이용되고 있는 분체 제조기술이다.

한편, 입자축소기술 (size reduction)은 기계적 에너지를 고체 덩어리에 가해 입자의 크기를 축소시키는 과정으로 분쇄라고 칭하며 광물 분체제조법으로 중요한 위치를 차지하고 있다. 즉, 분쇄란 기계적인 외력에 의해 고체상 물질을 세분화하여 입도의 축소와 비표면적의 증가를 시키는 에너지 소모가 매우 큰 기계적 단위 공정이다. 이처럼 고체 덩어리를 분쇄하여 분체로 만드는 목적으로는 계속적인 처리공정 (선별 공정)에 적합한 입도제조, 화학반응의 촉진을 위한 비표면적 증대, 복합성분의 단체분리 (liberation), 사용목적 (최종산물)에 적합한 입

도제조 등을 들 수 있다. 특히 동일 광물질이라도 그의 입도에 따라 가격이 천차만별이다. 석회석의 예(표 1)를 보더라도 입도만 미립화되어도 그의 부가가치는 매우 높아짐을 알 수 있다. 한편 그림 1에서 알 수 있듯이 이러한 석회석의

미립화 단계별 사용되는 분쇄기의 종류는 매우 다양하다(정충식, 2003).

따라서 본고에서는 광물 분체 제조시 사용하는 입자축소기술인 분쇄에 대해서만 언급하고자 한다.

표 1. 석회석의 용도별 입도 및 가격(천원/ton, 도착기준).

구 분		용도	입도	가격	
물리적 가공 (파분쇄)	분, 괴	시멘트, 제철, 제강	25~80mm	5~17	
	보통탄산칼슘	도로포장, 배연탈황, 사료용, 유리용	28~365mesh	15~35	
	중질탄산칼슘 (CaCO ₃)	저급	건축, 유리섬유, 저급플라스틱	10 μ m이상	35~60
		중급	플라스틱, 실란트, 페인트	1~10 μ m	70~150
고급		제지 플라스틱	0.35~1 μ m	150~250	
화학적 가공 (가열, 합성)	생석회(CaO)	제강, 화학공업, 환경, 비료	100mesh~65mm	65~100	
	소석회(Ca(OH) ₂)	건축, 정수, 피혁가공, 식품첨가, 비료	-200mesh	60~120	
	경질탄산칼슘 (CaCO ₃)	일반	고무, 제지, 치약, 식품첨가	1~4 μ m	200~300
		교질	실란트, 잉크, 고무	0.01~0.3 μ m	400~500

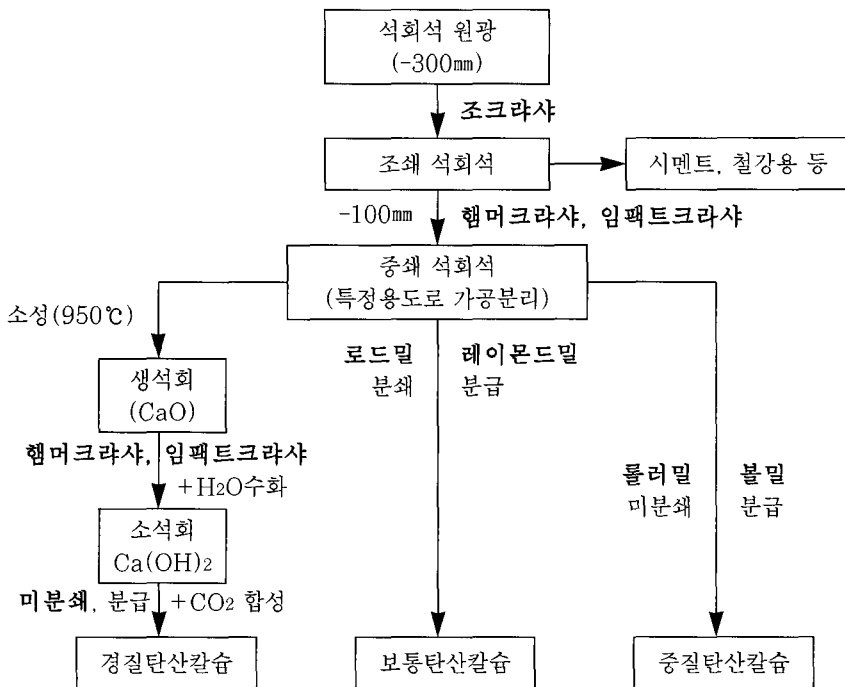


그림 1. 석회석 가공 단계별 분쇄공정.

분쇄이론과 분쇄한계설

분쇄는 고휘 입자에 에너지를 가하여 그 입도를 축소해 가는 과정이므로 분쇄에 필요한 에너지는 분쇄 전후의 입도 변화에서 계산될 수 있다. 그러나 분쇄시 소요되는 에너지의 대부분은 열, 소리, 진동 등의 에너지로 소모되고 실제로 광석자체가 분쇄되는데 소요되는 “순수분쇄에너지”는 투입된 에너지의 극히 일부(1% 내외)에 지나지 않는다. 따라서 “순수분쇄에너지”를 정량적인 양으로 구한다는 것은 매우 어렵지만 현재까지도 Rittinger분쇄이론(1867년), Kick분쇄이론(1885년), Bond분쇄이론(1952년)과 같이 분쇄 전후의 입도와 관련시킨 고전적인 이론들을 이용하여 소요된 에너지를 계산하고 있다(최우식, 1994; Wills, 1997).

(1) Rittinger 분쇄이론 (1867년)

이 이론은 분쇄에 필요한 에너지는 새로 생성된 입자의 표면적(표면에너지)증가에 비례한다는 분쇄에너지 이론으로 미분쇄(수십~수백 μm 입도 범위) 공정에 잘 적용되는 것으로 알려져 있다.

$$\therefore E = c \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

여기에서, D_1 는 급광(Feed)의 최대 입도를 뜻한다. 그러나 실제 조업에서는 80% 통과누적 입도(F_{80})로 정한다. D_2 는 분쇄산물의 최대 입도(P_{80})를 뜻한다. 그러나 실제 조업에서는 80% 통과누적입도(P_{80})로 정한다. E 는 입도가 D_1 인 물질을 D_2 까지 분쇄하는데 필요한 단위중량 당 에너지, 그리고 c 는 물질상수를 의미한다.

(2) Kick 분쇄이론 (1885년)

분쇄하는데 필요한 에너지는 분쇄전후의 입자

크기에는 무관하며, 분쇄되는 물질의 입도비가 같으면 이에 소요되는 분쇄에너지도 동일하다. 즉 분쇄에너지는 분쇄비(Reduction ratio)인 D_1/D_2 의 함수로서 파쇄공정에 잘 적용되는 것으로 알려져 있다.

$$\therefore E = c \log \frac{D_1}{D_2}$$

(3) Bond 분쇄이론 (1952년)

Rittinger 분쇄이론과 Kick 분쇄이론을 수정·보완한 제3의 분쇄이론으로 일정량의 균질한 물질에 가해진 전체 에너지는 분쇄산물 입도의 제곱근에 반비례한다. 이 이론식은 Ball mill의 분쇄공정에서 잘 적용되는 것으로 분쇄시 소요동력을 추정하는 보다 실질적인 방법으로 알려져 있다.

$$\therefore W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

여기에서, W_i 는 입자크기가 무한대인 광석 1ton을 분쇄산물 입도(D_2)가 100 μm 되게 분쇄하는데 필요한 에너지(kwh/ton)를 의미하는 것으로 일지수(work index, kwh/ton)라고 한다. 표 2는 실험을 통해 구한 물질의 일지수(W_i)값을 나타낸 것으로 일지수값이 큰 물질일수록 분쇄하는데 에너지소모가 크다는 것을 뜻한다. 따라서 광물에 대한 일지수(W_i) 값을 알면 입도 F_{80} 인 물질을 P_{80} 까지 분쇄하는데 필요한 전체 일(W)을 Bond 식으로부터 구할 수 있다.

한편 입자를 무한정 분쇄할 수 있는 것은 아니다. 입자가 어느 정도 미립화가 되면 입자의 응집, 미분체의 완충작용 등에 의해 더 이상 분쇄되지 않는다는 분쇄한계설이 있다.

분쇄한계에 대한 이론적 전개는 Tanaka가 처음으로 시도하였다. 분쇄기 중에서 피분쇄물의 분쇄가 이루어지는 초기에는 입자수가 적어 분

표 2. 물질의 일지수(kwh/ton).

물 질	일지수	물 질	일지수	물 질	일지수
중정석	4.73	백운석	11.27	규사	14.10
석고	6.73	석회석	12.74	화강암	15.13
형석	8.91	석탄	13.00	탄화규소	25.87
규암	9.85	시멘트 클링커	13.45	흑연	43.56
장석	10.80	석영	13.57	금강사	56.70

쇄력이 유효하게 피분쇄물에 전달되나 입자축소가 진행됨에 따라 입자수가 기하급수로 증가함으로써 분쇄력이 입자군에 유효히 전달되지 못하여 분쇄의 진행이 중지된다. 따라서 단위질량의 피분쇄물에 에너지 dE를 가하여 dS의 비표면적 증가를 가져왔을 때 dS/dE로 나타내는 분쇄에너지효율은 그 때의 비표면적 S가 한계치 S_{∞} 에 가까울수록 작아진다고 생각하고 다음과 같은 분쇄한계식을 제안하였다.

$$\therefore S = S_{\infty} (1 - e^{-kE})$$

이 같은 분쇄한계가 생기는 이유에 대해 Jimbo는 첫째 분쇄력의 전달기구상의 요인인 피분쇄물 입자의 분쇄대에서의 이탈과 입자층내의 분산에 의한 전달효율 저하, 둘째 입자 고유의 특성에 의한 요인으로 결정구조 등 고체 자체의 구조상 요인과 입자의 재결합현상 등을 들고 있다(최우식, 1994).

분쇄 메카니즘과 파분쇄기의 종류

파분쇄공정은 분쇄효율을 높이고 과분쇄(over grinding)를 방지하기 위해서 다단계로 실시하는 것이 일반적이다. 따라서 파분쇄공정은 크게 파쇄공정(crushing process)과 분쇄공정(grinding process)으로 대별된다. 파쇄공정은 다시 조쇄공정과 중쇄공정으로 세분되며, 주로

압축과 충격에 의해 입도축소가 이루어진다. 분쇄공정은 주로 충격과 마모에 의해 입도축소가 이루어지는 에너지 소모가 매우 큰 단위공정이다. 이처럼 분쇄에 작용되는 분쇄 메카니즘은 주로 압축, 충격, 마모, 전단 등이다. 그러나 이러한 분쇄 메카니즘이 단독으로 작용하는 경우는 드물고 두 가지 이상이 조합되어 작용하는 것이 일반적이며 그 종류에 따라서 분쇄산물의 입도와 입도분포, 그리고 입자형상이 달라진다. 마모에서 압축, 충격의 단계로 갈수록 분쇄에너지가 증가하며, 마모력과 전단력이 주로 작용하는 미분쇄기는 분쇄산물이 큰 입자군과 작은 입자군으로 형성되었다가 점차 큰입자군이 미립화되어 좁은 입도분포의 특징을 나타낸다. 그리고 압축력이 주로 작용하는 분쇄기는 입자의 미립화가 어렵고 입도분포의 폭도 넓으며, 충격력이 주로 작용하는 분쇄기는 이러한 중간적인 특성을 나타낸다(그림 2 참조). 따라서 분쇄기의 선정시, 주로 작용하는 분쇄 메카니즘을 고려하면 손쉽게 목적하는 용도에 적합한 분쇄기를 선택해서 사용할 수 있을 것이다. 분쇄기는 피분쇄물의 크기에 따라 분류하는 것이 일반적이지만, 분쇄력의 전달기구 및 방법에 따라 분류하기도 하므로 분쇄기를 분류하는 것은 매우 어렵다. 또 많은 분쇄기 제조업자가 새로운 형태의 분쇄기를 개발하여 나름대로 명명을 하고 있다. 지금까지 개발되어 범용적으로 사용되고 있는 분

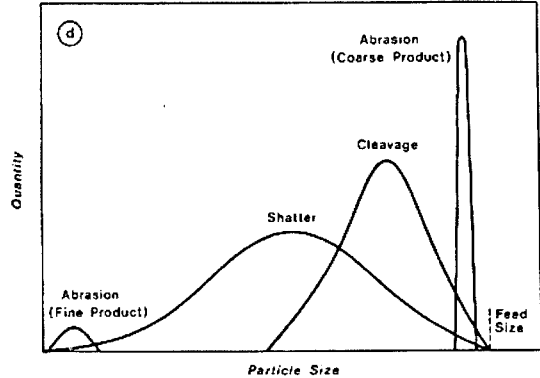
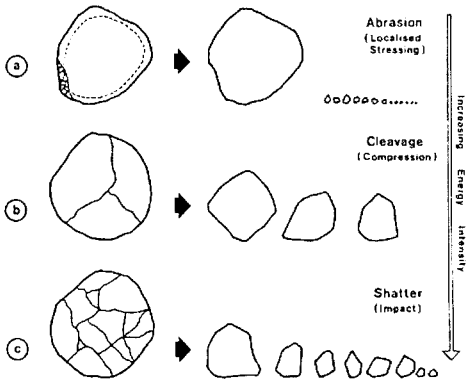


그림 2. 분쇄메카니즘과 분쇄산물 입도분포와의 관계.

쇄기의 종류는 다음과 같다(McCabe, et al, 1995; Wills, 1997).

(1) 조쇄기(coarse crusher)

채굴된 광석 덩어리를 압축력에 의해 수십cm 이하로 입도축소 시키는 1차 파쇄기를 일반적으로 조쇄기라 한다. 이에 해당하는 주요 장치로는 Jaw crusher와 Gyratory crusher가 있다. Jaw crusher(그림 3)는 턱모양의 2개의 파쇄판인 fixed jaw와 swing jaw의 맞물림에 의한 압축력으로 광석을 파쇄하는 장치로 선회축(pivot)의 위치에 따라 3가지 형태로 분류된다.

즉, 선회축이 swing jaw의 위 부분에 위치한 Blake형, 아래 부분에 위치한 Dodge 형, 그리고 중앙에 위치한 Universal형 Jaw crusher로 분류된다. Gyratory crusher(그림 4)는 원통으로 된 shell속에 원뿔모양의 crushing head가 85~150rpm으로 회전하면서 발생하는 압축력에 의해 연속적으로 광석을 파쇄하는 장치이다.

(2) 중쇄기(fine crusher)

일반적으로 조쇄기를 통과한 입도가 수cm의 광물을 압축, 충격 등의 작용으로 1cm이하로

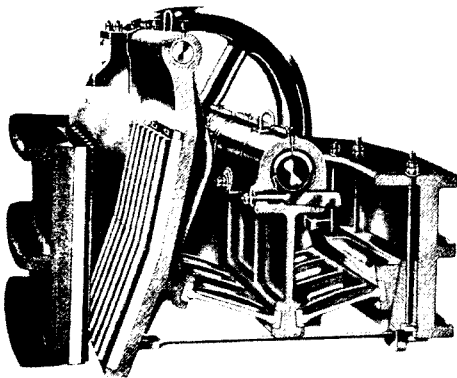


그림 3. Blake형 Jaw crusher.

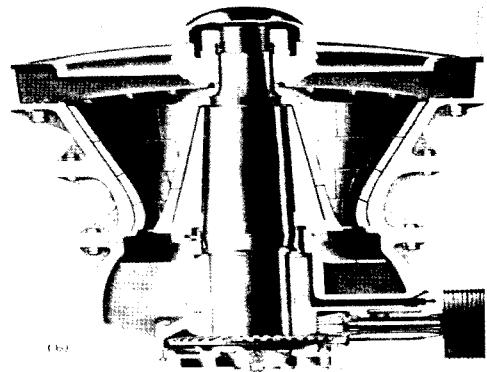


그림 4. Gyratory crusher.

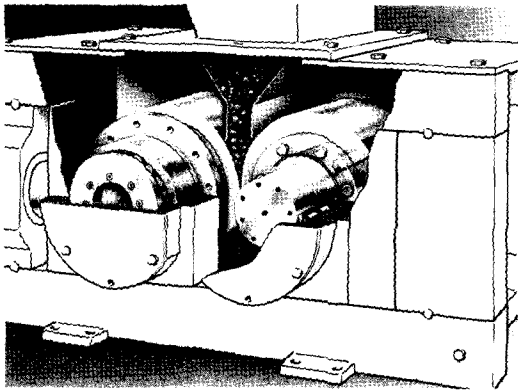


그림 5. Roll crusher.

입도축소 시키는 2차 파쇄기를 일반적으로 중쇄기라 한다. 이에 해당하는 주요 장치로는 Roll crusher, Hammer mill 등이 있다. Roll crusher(그림 5)는 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 roller에 의해 발생하는 압축력 및 전단력으로 광석을 파쇄하는 장치이다. Hammer mill(그림 6)은 디스크에 hammer를 여러 개 부착하여 고속 회전시 발생하는 충격력으로 광석을 분쇄하는 장치로 미립자 생성이 많으며, 파쇄물에 충격력을 가하는 햄머의 마모가 심해 분쇄산물의 오염이 우려되기도 한다.

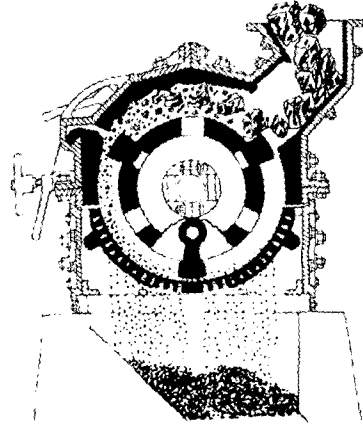


그림 6. Hammer mill.

(3) 분쇄기(Grinder)

분쇄공정의 실린더형 통속에 광물을 분쇄매체(grinding media)와 함께 넣고 여러 운동방식(회전, 진동, 교반 등)에 의해 발생하는 분쇄력(충격, 압축, 마모, 전단 등)으로 입도축소시키는 에너지 소모가 매우 큰 공정이다. 이때 사용하는 분쇄기의 종류는 매우 다양하여 분류하기 어렵지만 분쇄매체의 운동방식 또는 분쇄매체의 종류에 의한 분류를 시도하면 표 3과 같이 분류할 수 있다. 이러한 분쇄장치는 입도기준으로 볼 때 주로 1cm이하의 입자를 수십 μ m이하로 미분쇄하는데 사용하나, 밀도와 경도가 높은

표 3. 분쇄기의 종류.

분류방식	종 류	비 고
분쇄매체의 운동방식에 의한 분류	Tumbling mill	tank의 회전에 의한 media의 충격작용
	Vibration mill	tank의 진동에 의한 ball의 충격작용
	Attrition mill	arm의 회전에 의한 ball의 충격 및 마모작용
분쇄매체의 종류에 의한 분류	Ball mill	분쇄매체가 금속 ball 또는 세라믹 ball
	Rod mill	분쇄매체가 금속 rod
	Pebble mill	분쇄매체가 조약돌(hard rock)
	Autogenous mill	분쇄매체가 광석 그 자체
	Roller mill	분쇄매체가 roller
	Jet mill	고압기체

ceramic media를 사용하고 적당한 분쇄조제 (grinding aid)를 첨가할 경우에는 submicron 의 초미분쇄도 가능하다. 한편 분쇄매체 없이 입자를 압축공기와 혼합하여 충격에 의해 분쇄 하는 Jet mill도 있다(Itoh, 1994; Ichiro, 1994)

• 회전밀 (Tumbling mill)

실린더 용기(tank) 내에 ball, rod 등의 분쇄 매체(media)를 넣고 회전시키면 분쇄매체의 충격력과 마모력에 의해 피분쇄물의 입도축소가 이루어지는 분쇄기로, 구조가 간단하며 건식 및 습식분쇄는 물론이고 닫힌분쇄회로, 열린분쇄회로 등 어느 방식이라도 사용이 가능한 가장 범용적으로 쓰이는 미분쇄기이다. 사용되는 분쇄매체의 종류에 따라 Ball mill(그림 7), Rod mill, Pebble mill 등으로 분류된다. 회전밀의 분쇄효율을 결정짓는 주요 인자로는 mill의 회전수, media의 종류 및 장입량 등이 있다. 일반적으로 회전밀의 분쇄효율이 최대인 최적회전수는 습식 분쇄(wet grinding)의 경우는 임계회전수(Nc)의 60~70%, 건식분쇄(dry grinding)의 경우는 임계회전수의 70~85% 이다. 한편 ball이 tank 내벽에 붙어 회전하는 centrifuging 현상

이 일어나는 회전밀의 임계회전수 Nc(rpm)은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\therefore N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_m}}$$

여기서 Dm은 mill의 내경(m)이다. 그리고 분쇄매체는 밀도와 경도가 클수록 좋고, 그의 충전율은 부피기준으로 40~50% 일 때 최대분쇄 효율을 얻을 수 있다.

한편, 여러 크기의 ball을 장입하여 회전하면 큰 ball은 공급구측에 작은 ball은 배출측에 분포하여 큰 입자는 큰 ball에 작은 입자는 작은 ball에 의해 효과적인 분쇄가 행해질 수 있다는 특징을 지닌 Ball mill의 일종인 Conical ball mill(그림 8)도 있다.

• 진동밀 (Vibration mill)

진동밀은 ball을 장입한 tank를 고탄성 스프링 위에 부착하여 모터로 회전하는 편심축에 의해 shaking 운동을 함으로써 발생하는 ball의 진동에 의한 충격력으로 분쇄작용이 일어난다. 진동밀의 tank내에 장입하는 ball충전율은 회전밀의 ball충전율(40~50vol%)보다 많은 80vol%이고, ball이 tank 전체에서 운동을 하

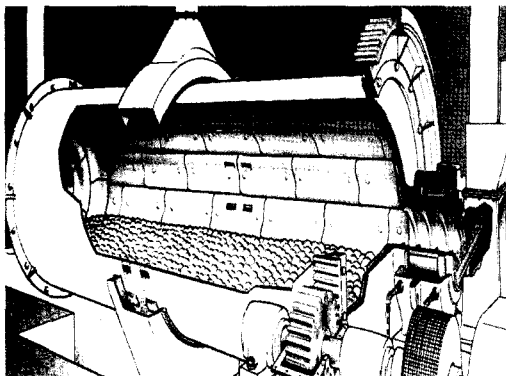


그림 7. Ball mill.

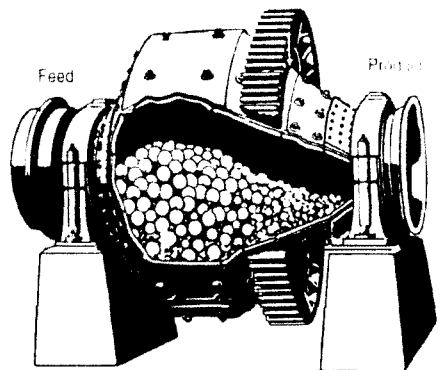
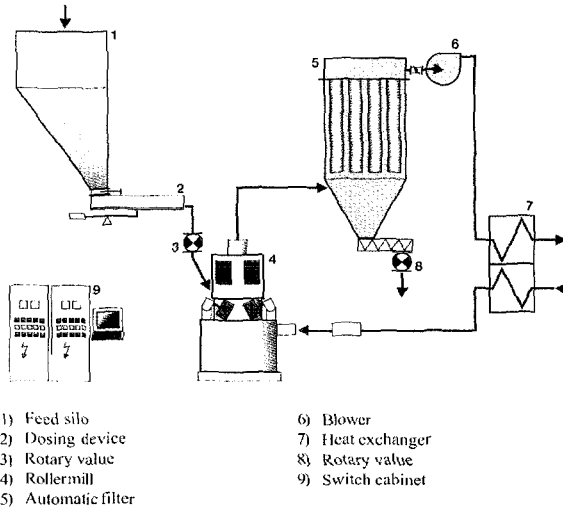
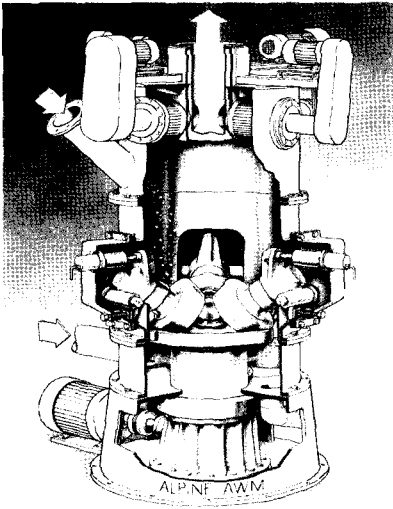


그림 8. Conical ball mill



- 1) Feed silo
- 2) Dosing device
- 3) Rotary value
- 4) Rollermill
- 5) Automatic filter
- 6) Blower
- 7) Heat exchanger
- 8) Rotary value
- 9) Switch cabinet

그림 9. Roller mill의 구조 및 분쇄공정도.

며 충격을 반복적으로 행하기 때문에 진동밀의 분쇄속도는 ball mill에 비해 10배 정도 빠르며, 습식분쇄 시 submicron의 초미분쇄도 가능한 것으로 알려져 있다.

• 롤러밀 (Roller mill)

독일 Loesche사에서 개발하여 일명 Loesche mill이라고 불리우는 Roller mill은 회전하는 table위에 역시 회전하는 여러 개의 roller가 공급된 광석에 압축, 전단, 마모력을 가하여 분쇄하는 장치이다. 특히 분급기(classifier)가 내장되어 있어 일정 입도이하의 분쇄산물은 즉시 외부로 배출시킴으로서 입도범위를 좁게 분쇄할 수 있어 일반 광석은 물론이고 석탄 및 시멘트 원료 분쇄에 비교적 널리 사용되고 있는 분쇄기(그림 9)이다.

• 제트밀(Jet mill)

Jet mill은 Hosokawa그룹인 독일의 Alpine사에서 개발한 유동층기류분쇄기이다. 그림 10에 나타난 것처럼 고압의 기체가 가지는 운동에너지를 이용해서 고압노즐로부터 분출하는 압축

공기로 생기는 제트기류 속에 입자를 공급하여 입자상호의 충돌 혹은 벽면과의 충돌에 의해 분쇄된다. 제트밀의 에너지효율은 다른 미분쇄기에 비해 낮은 편이지만 다른 기종에서 볼 수 없는 초미립자의 생산성, 분쇄매체를 사용하지 않기 때문에 이물질의 혼입이 전혀 없고 분쇄시의 온도상승이 적은 것이 특징이다. 따라서 분쇄과정에서 온도상승 및 오염방지가 절대적으로 필요하고 고부가가치가 높은 물질인 의약품, 농약, 식품, tonner 등의 분쇄에 적합한 미분쇄기이다.

• 교반밀(Attrition mill)

1960년초 미국의 광산국(US Bureau Mine)에서 개발된 교반밀은 다양한 재질의 ball과 피분쇄물을 mill내에 충전시킨 후 교반시킴으로서 분쇄가 이루어지므로 일명 매체교반형분쇄기(그림 11)라고도 한다. 이때 밀의 중앙에 위치한 교반기는 몇 개의 수평축을 가지고 회전함으로써 mill내에서 분쇄매체의 불규칙 운동을 유발한다. 이러한 불규칙 이동이 분쇄 매체의 충격작용을 일으키게 되며, 충격작용은 분쇄 매체

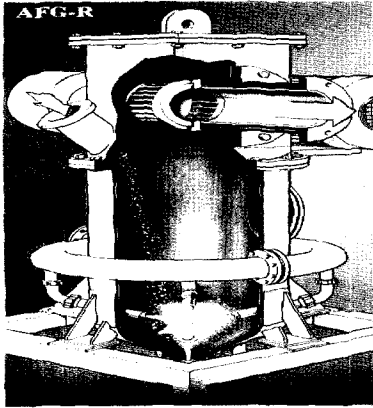


그림 10. Jet mill.

의 회전으로 생기는 전단작용과 함께 입자를 분쇄하게 된다. 교반밀에서의 불규칙 이동은 분쇄매체 사이의 충돌로 생기는 충격력, 분쇄매체에 작용하는 회전력 및 수평 교반축에 의하여 생긴 공간을 채우려는 매체의 중력이 조합되어 발생하는 것이라고 설명하였다. 결국 이러한 작용으로 교반밀은 다른 분쇄기보다 우수한 분쇄 및 혼합 효과를 보이게 된다. 따라서 적당한 분산제를 첨가하면 submicron의 분쇄산물도 얻을 수 있는 초미분쇄기이다.

분쇄회로

분쇄는 분쇄효율뿐만 아니라 분체 제품의 특성과 가치를 결정짓는 입도 및 입도분포의 조절을 위해 분쇄회로에도 관심을 기울여야 한다. 분쇄회로는 열린 분쇄회로(open grinding circuit)와 닫힌 분쇄회로(closed grinding circuit)로 대별된다.

열린 분쇄회로란 조분쇄에 적합한 분쇄회로로 mill내에 투입된 피분쇄물이 일정한 시간동안 분쇄후 전량 분체 제품으로 회수되는 공정으로 공정 자체가 단순하여 설치비가 저렴하고, 공정상 분쇄산물의 순환이 없으므로 오염 유입이 적

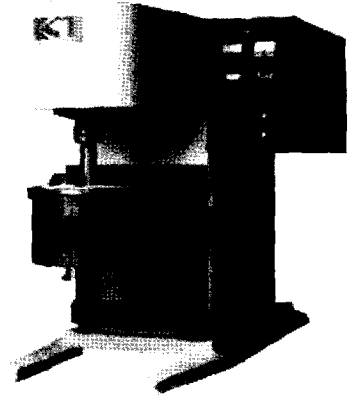


그림 11. Attrition mill.

다는 장점이 있으나 소정 입도이하로 미립화된 입자의 배출이 없어 과분쇄(over grinding)와 미립자의 완충효과(cushion effect)로 인해 분쇄효율 저하의 원인이 되기도 한다. 이러한 결과로서 분쇄산물의 입도분포가 넓은 특성을 나타낸다. 분쇄산물의 입도와 입도분포는 분쇄시간의 영향을 절대적으로 받아 원하는 입도와 입도분포를 얻기 위해서는 1회 분쇄만으로는 불가능하다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 다단계 분쇄 또는 닫힌 분쇄회로 방식을 채택하고 있다.

닫힌 분쇄회로(그림 12)는 분쇄기의 분쇄산물을 연속적으로 분급기(classifier)로 배출하여 분급기에서 일정한 입도로 분립, 하향흐름(under flow)의 조립자는 다시 분쇄기에 투입되어 계속해서 분쇄되고 상향흐름(over flow)의 미립자는 다음 단계의 분쇄기로 투입되거나 최종 분체제품으로 회수되는 방식이다. 이러한 분쇄회로방식은 과분쇄를 방지하여 제품의 입도분포를 좁은 범위로 조절이 가능할 뿐만 아니라 분쇄처리량을 증가시키는 것도 가능하다는 장점을 지니고 있다. 그러나 별도의 분급장치가 필요하여 설치비가 고가이고 분급공정과 조립자의 순환에 따른 피분쇄물의 오염이 우려되기도 한다.

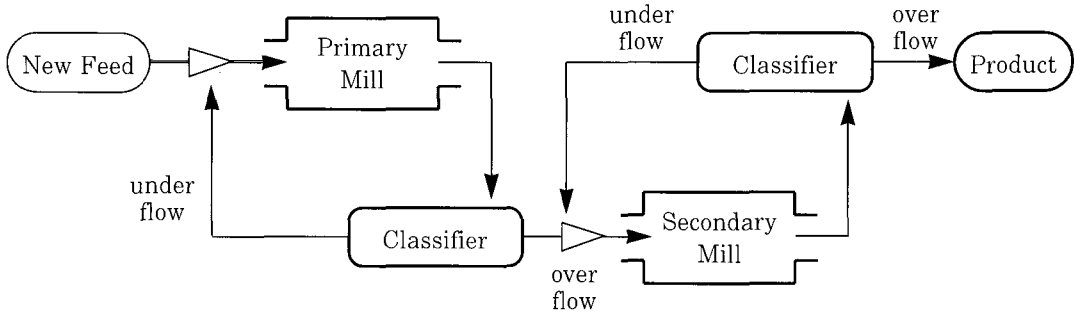


그림 12. 2단계 닫힌 분쇄회로.

광물 분체 제조기술의 발전동향

분체 제조공정에서의 단위조작은 다양한 전개를 보이고 있다. 그림 13은 그 구체적인 사례를 설명하기 위하여 종래의 기본적 단위조작인 분쇄와 분급의 예를 들어 그 진보와 종래 기술을 비교한 것이다(서태수와 변운섭, 2003).

광물 분체 제조기술 중에서 가장 일반적인 분쇄는 앞서서도 언급하였듯이 기계적 방법에 의해 고체덩어리를 세분화하여 보다 미세한 입자로 만드는 단위조작으로 자리매김해 왔다. 이처럼 분쇄의 최대 과제는 micron벽을 돌파하는 일이었으나 고강도, 고밀도 분쇄매체의 개발과 분쇄조제의 첨가 등으로 인해 Ball mill의 습식

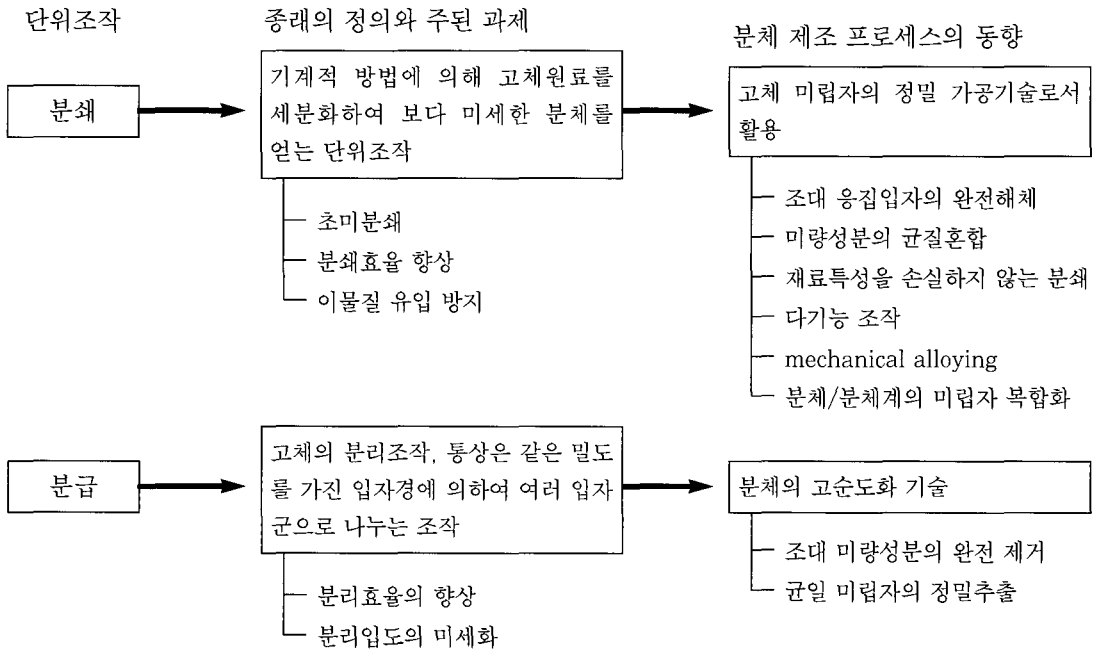


그림 13. 분체 단위조작의 동향 예.

분쇄만으로도 상당히 현실화되어 있다. 또한 분쇄공정에서 중요한 것은 동력비이다. 독일학자인 Rumpf는 세계 전체 생산에너지의 약 5%가 분쇄에 소비되고 있고, 시멘트공장의 분쇄공정에 사용되는 전력은 시멘트 1ton 생산시 약 80~90kwh로 전체 제조원가의 20~30%이라는 연구보고(김송호, 1987)를 통해 알 수 있듯이, 분쇄효율이 약간만 향상되어도 막대한 에너지 절약에 공헌하게 되므로 분쇄 제조기술 중 분쇄효율의 향상 발전은 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 학계 및 산업계에서는 분쇄효율을 향상시키기 위한 새로운 분쇄기의 연구개발에 꾸준히 노력하고 있다. 이러한 노력의 예를 살펴보면 다음과 같다.

1960년대 독일 Loesche사에서 개발하여 일명 Loesche mill이라고 불리우는 Roller mill은 개발 초기에는 대용량화와 에너지 절감의 관점에서 우수한 효율이 인정되었으나 경질물질이면서 분쇄산물의 입도가 보다 미세한 클링커나 슬래그 분쇄에 있어서는 진동발생에 따르는 기계적인 문제, 설비의 마모 및 분쇄산물 입도분포 특성에 기인하는 제품품질 등의 문제로 별로 관심을 끌지 못했다. 그러나 지속적인 연구개발을 통해 이러한 문제점들이 점차 해결되었고, 특히 1982년 일본 미쯔비시 중공업은 mill내에서 분쇄된 일정 입도 이하의 분쇄산물을 즉시 배출시킬 수 있는 외부 순환시스템(external circuit system)을 개발하여 Roller mill에 부착함으로써 총 분쇄에너지 감소에 크게 기여하였다. 이렇게 지속적으로 개선된 Roller mill은 1990년대 들어와서는 시멘트공장 및 광물 분쇄공장 등에서 본격적으로 사용되고 있다(노갑수, 1994). 또한 분쇄과정에서 온도상승 및 오염방지가 절대적으로 필요하고 고부가가치가 높은

물질의 분쇄에 적합한 Jet mill은 Hosokawa그룹인 독일의 Alpine사에서 개발하여 제약회사, 식품회사 등에서 널리 사용되고 있다.

그리고, 분쇄가 분체 제조의 단위조작 중에서 가장 에너지 효율이 낮은 공정이지만 분체 제조프로세스 관점에서는 분쇄 시 발생하는 열을 건조공정에 효과적으로 활용하거나 분쇄와 혼합 및 분산 등을 동시에 수행하는 프로세스의 다기능화 시도가 활발히 전개되고 있다. 이와 같이 분체제조 프로세스에서의 분쇄와 분급은 종래 기술의 틀에서 벗어나 발전해 왔고, 입도와 입도분포의 정밀제어, 입자의 표면개질, mechanical alloying, 입자의 복합화 등, 그 중 몇 가지는 이미 새로운 단위조작으로 정착해 가고 있다(Yokoyama, 1999).

한편, 21세기 신기술의 하나인 나노기술(nanotechnology)로 인해 최근 입자의 크기에 대한 요구가 micron 영역의 미립자에서 0.1 μ m 이하의 초미립자, 0.01 μ m 이하의 나노입자 영역으로 전개해 가고 있다(Yamamoto, 1999). 나노미터 크기의 분체는 기존의 micron이나 submicron크기의 분체에서 관찰되지 않은 특성을 나타낸다. 예를 들어 충전재(filler)로 많이 쓰이는 티타니아(TiO₂) 분체는 μ m크기 영역에서는 특이한 물성을 나타내지 않지만 입자크기가 수십 nm 영역이 되면 자외선 파장대에서 광촉매 반응을 나타내어 고부가가치가 매우 높은 다양한 환경소재로 각광을 받고 있다. 이처럼 나노입자에 대한 관심이 그들이 가지는 독특한 특성에 기인하는 재료적 관심에서 시작되었다는 사실과 그 제조기술 역시 전통적인 분체 제조기술인 분쇄에 의해서는 제조될 수 없기 때문에 그에 따른 새로운 분체 제조기술의 연구개발이 추진되고 있다.

참고 문헌

- 김승호, 1987, 시멘트 산업에서의 분쇄·분급 기술, 요업재료의 과학과 기술, Vol. 2, No. 2, pp.133~144.
- 강성호, 2003, 분립체의 활용을 위한 공정기술, 제28회 자원활용소재 워크샵, pp.23~44.
- 노갑수, 1994, 시멘트 공업에서 본 분체공학의 현황과 과제, 한국화학공학회 심포지엄 시리즈 94-04, pp.1~9.
- 서태수, 변윤섭, 2003, 분체기술의 새로운 전개, 제28회 자원활용소재 워크샵, pp.85~94.
- 정충식, 2003, 석회석의 응용과 부가가치 향상, 광업진흥, 제 111호, pp.74~83.
- 최우식, 1994, 최근의 미분쇄 기술의 개발 및 연구동향, 한국화학공학회 심포지엄 시리즈 94-04, pp.1~9.
- Davis, R., et al, 1994, The Legacy of Neglect in the U.S., Chem. Eng. Progr., 90(4):32.
- Ichiro Nishmura, 1994, Recent trend of fine grinding mills, 한국화학공학회 심포지엄 시리즈 94-04, pp.23~30.
- Itoh Hitoshi, 1994, Recent trend of jet mill grinding, 한국화학공학회 심포지엄 시리즈 94-04, pp.71~81.
- McCabe, W. L., et al, 1995, Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill.
- Yamamoto Hideo, 1999, 粉體技術, 21世紀はこうなる!?, 粉體と工業, Vol. 31, No. 2, pp.65~70.
- Yokoyama Toyokazu, 1999, 粉碎・分級操作によつて高機能粉體を製造する, 粉體と工業, Vol.31, No. 5, pp.59~68.
- Wills, B. A., 1997, Mineral Processing Technology(6th), Butterworth Heinemann, Oxford.

표지 제자(題字) 설명

본 잡지의 제자(題字)는 2000년도 국전 특선 작가이신 가산(嘉山) 김택수(金宅洙) 선생께서 써주셨습니다. 가산 선생님은 개인적으로는 충북대 지질학과 안중호 교수의 장인이십니다.

