

## 석회석의 분쇄 및 분쇄 장치

공 봉 성 · 김 영 훈

대한광업진흥공사 기술연구소

국내에서의 석회석 산업은 대규모의 시장이 형성되어 있는 국가적 기간산업이고, 석회석의 부존자원으로서의 잠재성도 크다는 것은 주지의 사실이다. 최근에 대두되는 환경문제와 생산 원가의 상승으로 인해 국내 석회석 산업계는 석회석 자원의 효율적 개발과 부가가치의 증진이 절실히 요구되는 상황이다.

현재 석회석은 플라스틱, 고무, 도료, 제지 및 식·의약품 등의 충전제(filler)로서 공업적으로 널리 사용되고 있는 무기 분체 중의 하나이다. 특히 제지공업에서 충전제와 코팅제로 쓰이며, 백색도, 광택, 불투명성, 잉크 수리성 및 입자의 형상과 크기 등의 제어가 뛰어나 다양한 용도로 사용되고 있다. 또한 산업이 발달함에 따라 제품의 종류 및 용도가 다양해지고 규모가 커짐에 따라 그 기반이 되고 있는 원료 소재의 수요가 증가하고 있을 뿐 아니라 종류가 다양해지는 상황에서 국내산 산업광물(industrial mineral) 자원의 효율성을 제고하기 위한 노력이 우선 이루어져야 할 것이다. 한정된 광물자원의 부가가치를 높이기 위해서는 용도개발과 정제기술도 중요하지만, 우선 광석의 특성을 정확히 파악하여 이를 다양한 용도에서 요구되는 품질요건에 대비하는 것이 보다 기본적이고도 중요한 사안이라고 판단된다.

근래에 들어 제품의 기능 개선에 중요한 역할을

하는 소재 원료로서 중요도가 높아지는 가운데 용도별 수요자 요구에 부합되는 재료 생산을 위한 가공기술 역시 급속한 발전이 이루어지고 있는 추세이다. 광물자원을 산업원료 소재로 활용하기 위하여 고품위화는 물론이고 용도에 적합한 크기로 맞추는 입도조절 역시 필수적이다. 입도조절의 근간을 이루는 분야는 파·분쇄이며 파·분쇄는 고체 입자를 더 작은 입자로 부수거나 잘라내는 모든 기술이며, 에너지를 대량으로 소비하는 단위조작이며, 장치의 특성에 따라 효율이 현저히 달라지는 장치산업이라고 할 수 있다.

자원산업에서의 대표적인 처리기술이라 함은 수요자의 요구에 따라 합당한 품위를 유지하는 품위 향상 기술과 적당한 크기로 입도를 조절하는 파·분쇄 기술이 주를 이루고 있으며 최근에는 나노 사이즈의 입자까지 제조하여 응용하는 기술 또한 각광을 받고 있다. 따라서 본 보에서는 파·분쇄이론, 파·분쇄 매카니즘별 분쇄 장치에 대한 개략적인 특성과 석회석 습식 분쇄 특성 사례를 소개하고자 한다.

### 파쇄 및 분쇄 이론

분쇄란 고체 입자에 힘을 가해 잘게 부수거나 잘라내어 작은 입자로 만드는 입도 감소를 의미

한다. 고체를 잘게 부수는 목적은 고체의 표면적을 증가시켜 연소반응 속도를 높이고, 건조나 추출의 속도를 증가시키며, 입도를 작게 함으로서 고체의 혼합을 용이하게 하거나 분체의 색상을 개선하고 또한 미분체 입자로 제조하여 기능을 부여하는 등 첨단 소재 원료로 이용하기 위함이다. 분쇄는 입자의 크기에 따라 조쇄, 중쇄, 미분쇄 등으로 구별되고, 1 $\mu$ m 이하로 분쇄할 때 초미분쇄(ultrafine grinding)라고 한다. 분쇄는 오래 전부터 사용된 단위조작으로 많은 에너지를 소비하고, 효율이 현저하게 낮은 반면에, 제조 비용이 비교적 싸고, 몇 가지 분쇄법의 특징이 있기 때문에 능률 좋은 프로세스의 개발이 중요하다.

## 파쇄 및 분쇄 이론과 실제

분쇄는 분체공학에 있어서 중요한 단위조작으로, 입경이 감소하기 때문에 어떻게 하면 효율적으로 분쇄할 수 있겠는가에 연구가 집중되었기 때문에, 분쇄됨에 따라 분쇄물 자체의 물리화학적 성질이 변화해 가는 현상에 대해서는 오랫동안 연구가 이루어지지 못했다.

분체의 흡착성과 반응성의 증대에는 고체의 표면적이 관여하고 있다. 비표면적이 증대하면 세라믹스원료에서는 고상반응의 속도를 촉진시킬 수가 있고, 안료와 도료에서는 매질 중에 균일하게 분산되어 늘어남과 퍼짐을 향상시킬 수 있다.

### 리팅거의 법칙(Rittinger's law)

분쇄공정의 해석에 비표면적의 개념을 처음으로 도입한 연구자는 리팅거(Rittinger : 1867년)이다. 즉, 분쇄에 따라 비표면적이  $S_0$ 에서  $S$ 로 증가했다고 하면,  $S-S_0$ 는 분쇄소비에너지  $E$ 에 비례한다는 것이 리팅거의 식이다.  $k$ 는 정수이다.

$$E = k(S - S_0) \quad (1)$$

리팅거 직선의 기울기  $E/S$ 는 리팅거수( $R$ 수)라고 불리우며, 광물 등이 분쇄되기 쉬움성의 척도로 사용되고 있다. 로스(Rose)는 진동 불분쇄에 의한 분쇄저항(석영을 1.0으로 하는 상대치)과 모스경도는 관계가 있다고 보고하고 있다. 한편, 비표면적의 증대는 표면에너지의 증대와 관계가 있다. 쿠즈네토프(Kuznetsov)는 분쇄방법이 같으면 각각 고체의 표면에너지에 비례한 분쇄량이 얻어진다고 하여 경도와 표면에너지와의 관계를 나타내었다. 리팅거수( $R$ 수)도 상대적으로 표면에너지를 나타내는 수치로서 취급할 수 있음을 알 수 있으며 표면에너지는 경(硬)할수록 크고, 무른 것일수록 작다.

### 킵의 법칙(Kick's law)

리팅거에 대해서 킵(Kick, 1885년)은 다음과 같은 논리를 제시했다. 즉, 분쇄의 각 단계에 있어서 분쇄비를  $\gamma$ 로 나타내면  $n$ 단계에서의 전분쇄비는  $\gamma^n$ 이 된다.

$$\gamma^n = \frac{S_0}{S} \quad \text{또는} \quad n \log \gamma = \log \frac{S_0}{S} \quad (2)$$

1단계에 요하는 에너지를  $E_1$ 이라 하면 전단계의 에너지  $E$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = nE_1 = \frac{E_1}{\log \gamma} \log \frac{S_0}{S} \quad (3)$$

여기에서  $E_1$ 과  $\gamma$ 은 각 단계에서 일정하기 때문에 다음의 식과 같게 되고, 분쇄 일량은 입자 증가분의 대수에 비례하는 것으로 하고 있다.

$$E \propto \log \frac{S}{S_0}, \quad W = k \log \frac{S}{S_0} \quad (4)$$

분체공학에서는 분쇄를 파쇄(crushing)와 분

쇄(grinding)로 크게 나누어 고려하고 있는데 파쇄에는 킥의 식이, 분쇄 내지 미분쇄에는 리팅거의 식이 일치한다고 알려져 있다. 일반적으로 분쇄가 진행됨에 따라 리팅거의 직선 관계는 점차로 이탈하여 분쇄의 효율은 빠르게 저하하고, 결국에는 어느 정도 분쇄에너지를 투입해도 표면적의 증가는 전혀 보이지 않는 상태가 된다 ( $dS/dE = 0$ ). 그 후의 분쇄에너지는 오로지 입자의 운동이나 마찰, 결정격자 내의 함유량의 증대에 사용되게 된다. 'Tanaka'는 이 경우의 한계 비표면적을  $S_{\infty}$ 로 하고, 그것과 비표면적  $S$ 와의 차가 분쇄속도를 정한다고 가정하여 다음과 같은 식을 제안했다.

$$\frac{dS}{dE} = k(S_{\infty} - S) \quad (5)$$

이 식을  $S_0$ 에서  $S$ 까지 적분하면 다음 식이 된다.

$$\ln \frac{(S_{\infty} - S_0)}{(S_{\infty} - S)} = KE \quad (6)$$

$S > S_{\infty}$ 의 경우에는 다음과 같은 근사식으로 나타내어진다.

$$S = S_{\infty}(1 - e^{-KE}) \quad (7)$$

즉, 분쇄 중의 비표면적의 변화는 에너지의 지수함수로 나타낼 수 있다. 여기에서  $K$ 는 분쇄물의 성질과 분쇄조건에 의해 정해지는 분쇄계수이다.  $(S_{\infty} - S)$ 가 작을수록 분쇄는 한계에 가까워진다. 그 원인으로서 미립자간에 작용하는 반데르발스 힘이나 정전기력 등에 의한 입자의 응집, 입자표면의 격자 혼란에 의한 응력의 완화가 고려된다.

리팅거 이후 분쇄의 일량은 분쇄량의 증대에 정비례하고, 표면적의 증가만이 분쇄의 일량을 규정하는 것으로 알려져 왔는데, 새로운 표면의

생성뿐 아니라 분체입자 자체의 표면이나 내부까지 미치는 구조변화를 무시할 수가 없게 되었다. 이렇게 해서 격자 내에 축적된 에너지가 결정의 변화에 필요한 에너지에 달하면 방해석(calcite)→아라고나이트(aragonite) 전이와 같은 현상이 나타나는 것이다. 분쇄와 같이 힘으로 가해진 기계적 에너지에 의해서 고체물질이 갖는 물리화학적 성질에 변화를 일으키는 현상은 메카노케미칼 효과로서 주목되고 있다.

### 본드의 법칙(Bond's law)

분쇄는 새로운 표면을 생성하고, 표면 에너지의 증가가 분쇄일량이라는 인식이 원래 'Rittinger(1867)의 법칙'으로, 단위질량의 일  $W$ 는 비표면적 증가에 비례한다. 이 법칙은 분쇄효율은 일정하며 기계화 원료가 정해졌을 때 원료와 제품의 크기에는 무관하다.  $x_1, x_2$ 를 각각 원료, 해쇄물의 대표 입경으로 하고,  $R = x_1/x_2$  (분쇄비, Reduction ratio)로 하면

$$W \propto \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) = \frac{1}{x_2} \left( 1 - \frac{1}{R} \right) \quad (8)$$

리팅거의 법칙은 고체 단위질량당의 에너지가 별로 크지 않을 때 매우 적절하게 적용된다. 한편, 탄성변형에 근거하는 에너지법칙이 킥의 법칙으로,

$$W \propto \log R \quad (9)$$

이것을 미분식으로 쓰면,  $dW \propto (-dx/x^n)$ 로 되고  $n=2$ 에서 리팅거의 식,  $n=1$ 에서 킥의 법칙이 적용된다. Bond(1952)는  $n=1.5$ 를 택해서 제3법칙을 제창했다. 분쇄와 미분쇄에 필요한 동력을 계산하는 최신방법이 본드에 의해 제시되었다. 약간 추론적인 이론에 근거한 본드의 법칙은, 매우 큰 원료를 크기  $D_p$ 의 입자로 만드

표 1. 분쇄의 일지수(work Index)

Material	Sp. gr.	Work Index (Wi)
Cement clinker	3.15	13.45
Cement raw material	2.67	10.51
Clay	2.51	6.3
Coal	1.4	13
Coke	1.31	15.13
Gypsum rock	2.69	6.73
Iron ore	3.53	12.84
Limestone	2.66	12.74
Phosphate rock	2.74	9.92
Quartz	2.65	13.57
Shale	2.63	15.87
Slate	2.57	14.3
Trap rock	2.87	19.32

는데 필요한 일은 제품의 표면적대 부피의 비 (sp/vp)의 제곱근에 비례한다는 법칙으로서  $s_p / v_p = 6 / \phi_s D_p$ 이므로

$$\frac{P}{in} = \frac{K_b}{\sqrt{D_p}} \quad (10)$$

$K_b$ 는 기계의 종류와 분쇄 원료에 의존하는 상수이며, 이 법칙은 리팅거의 법칙에 비하여 작은 입자를 생성할 때 적용되며, 비교적 적은 에너지를 요구한다. 본드의 법칙은 공업용의 분쇄기나 미분쇄기의 동력소요량을 계산하는 데 실제적으로 적용된다.

제품의 80%가 100 $\mu$ m의 체를 통과할 수 있도록 매우 큰 원료를 분쇄하는데 필요한 총에너지로서 일지수(work Index,  $W_i$ )를 정의한다. 원료의 80%가 mesh 크기  $D_{pamm}$ 를 통과하고, 제품의 80%가 mesh 크기  $D_{pbmm}$ 를 통과한다면,

$$\frac{P}{in} = 0.3163W_i \left( \frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right) \quad (11)$$

여러 가지 원료에 대해 많은 분쇄기의 실측치에 근거하는 평균치로서 계산된 것으로 분쇄의

일지수(work index)를 표 1에 나타내었다. 건식분쇄에는 표의 값에 4/3을 곱한다. Bond의 법칙은 공업용의 분쇄기나 미분쇄기의 동력소요량을 계산하는 데 실제적으로 적용되고 있다.

## 파쇄 및 분쇄 기구

### 파 · 분쇄 기구

각종 분체공업에 있어서 분쇄조작으로 다루는 고체의 크기는 m급의 덩어리로부터 mm급의 초미분 입자까지 10<sup>9</sup>의 폭이 있다. m, cm, mm까지는 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-1</sup>의 변화이지만, mm부터  $\mu$ m,  $\mu$ m부터 nm까지는 각각 10<sup>-3</sup>의 변화이다. 최근 각종 분체공업의 미분화에 따라 넓은 입자경의 영역에서 수많은 분쇄기가 개발되고 있다. 한편, 분쇄조작에 투입되는 에너지는 전 세계에서 연간 약 500억 kWh라고 말해지고 있으며, 그 대부분이 시멘트, 석탄, 골재의 파쇄 등 재래형 분쇄에 소비되고 있기 때문에, 이 분야의 파쇄, 분쇄기의 기술적 진보도 현저하다. 이처럼 괴(塊), 립(粒), 분(粉)

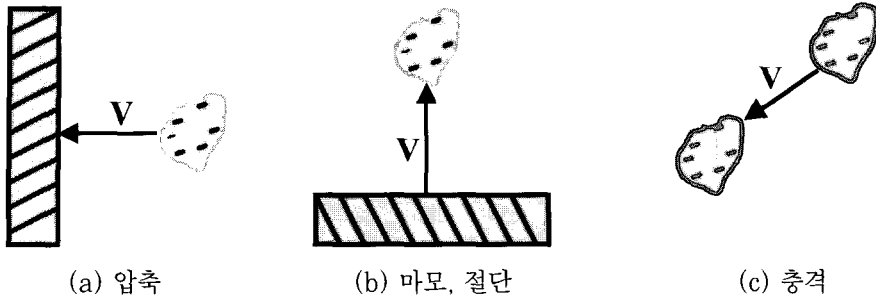


그림 1. 분쇄의 원리 개념도.

그리고 폭 넓은 크기의 고체를 취급하는 분쇄작업에서는 다양한 프로세스, 분쇄기가 사용되고 있다. 분쇄기는 취급되는 재료의 크기에 따라 분류하는 것이 일반적이지만 엄밀히 말하면, 원료의 크기가 정의되어 있는 것은 아니다. 또 많은 분쇄기 제조업자가 다양한 분쇄기를 개발하여 널리 사용되고 있는 것이 현재의 실정이다.

고체를 분쇄하는 원리는 대개 4가지로 분류된다. 즉 힘의 종류에는 인장, 굽힘, 압축, 문지름, 충격, 전단 등 여러 가지의 것들이 고려되고 있지만, 가장 일반적인 힘은 압축, 충격, 마모, 절단이 그것이다. 압축의 원리는 딱딱한 고체를 조분쇄하는데 쓰이고 충격은 조분쇄나 미분쇄에 함께 쓰이며, 마모의 원리는 연하고 마모성이 적은 물질을 미분말로 분쇄하는데 쓰인다. 절단의 원리는 일정한 크기나 모양의 입자를 생산하는데 쓰인다. 그러나 대개의 경우 이 4가지 모두 작용된다. 그림 1은 분쇄의 원리를 나타낸 그림이다.

분쇄물의 입경과 형상은 분쇄물의 종류와 분쇄기의 분쇄작용의 양쪽에 의존한다. 즉, 같은 분쇄물이라도 작용하는 힘에 따라서 입자의 크기, 형상, 분포 등의 특성이 달라지기 때문이다. 전단력이 작용하는 분쇄는 가장 미세화되고, 또한 입경 분포 폭도 좁다. 이에 대해 압축력만으로는 미세화가 달성되기 어렵고 입경 분포의 폭도 넓다. 충격력은 이러한 중간적 특성을 나타낸다.

이와 같이 전단력은 입자를 미세화하기 때문에 가장 미세화하는 데는 효과적이지만 미끄럼 변형에 의한 격자 스트레인의 발생이 현저하고, 입자 자체의 물리화학적 변화가 일어나기 쉽다.

대표적인 파·분쇄 기구를 모델적으로 나타낸 것이 그림 1이다. 먼저, 압축력은 벽개성이 있는 광물 원료의 분쇄에 이용되는데 조크러셔(jaw crusher)나 사이레토리크러셔(gyratory crusher)등이 그 대표적인 것이다.

롤밀(roll mill)과 에지런너(edge runner) 등은 혼합기로서도 사용되고 있으며, 점토나 페라이트의 미분쇄나 혼합에 넓게 이용되고 있다. 충격력을 이용하는 기종으로서서는 볼의 충격을 이용한 볼밀(ball mill)과 튜브밀(tube mill), 회전햄머의 충격을 이용한 햄머밀(hammer mill)등이 있고, 전단력을 이용하는 대표적인 것은 돌절구나 유발에 의한 마쇄이다. 그러나 실제의 분쇄기에서는 이러한 힘이 단독으로 작용하는 것이 아니고, 이러한 힘들이 조합하여 분쇄원료가 효율적으로 분쇄될 수 있도록 설계되고 있다. 표 2에서 (a), (b)는 조(粗)쇄기로서 이용되고, 100mm 이하의 원료의 크기를 40mm 이하로 분쇄한다. (c), (d), (e), (h)는 중쇄기로 50~6mm의 원료를 10~3mm로 하고, (f), (g)는 미분쇄기로 10~3mm의 원료를 150 $\mu$ m이하로 한다. 조쇄기, 중쇄기, 미분쇄기의 분쇄비(원료와 분쇄물과의 크기의 비)는 각각 3~4,

표 2. 분쇄기의 분쇄 기구.

분쇄기	압축	충격	마찰	전단	굽힘
(a) Jaw crusher	○				
(b) Gyratory crusher	○				○
(c) Roll crusher	○			○	
(d) Edge runner	○		○	○	
(e) Hammer crusher		○			
(f) Ball mill		○	○		
(g) Jet mill		○	○		
(h) Disk crusher			○	○	

5~10, 20~50이다.

세라믹스 제조용의 미분체는 주로 미분쇄기에 의해 제조되는데 이 방면에는 신기종이 많다. 보통의 볼밀이나 로드밀을 용기, 구동부와 함께 진동시키는 진동밀, 고압공기의 분사의 장에서 입자들 끼리를 충돌시켜서 분쇄하는 제트밀 등이 그 대표이다. 예를 들면, 자기 테이프용 페라이트의 제조에는 보통의 미분쇄기로서는 형상이

구상으로 되거나 응집입자가 되기 쉽기 때문에 충격력을 이용하는 제트밀이 적당하고, 1 $\mu$ m 정도의 침상결정을 얻을 수 있다.

시멘트 공장에서 다수 사용되고 있는 튜브밀 (tube mill)은 원통이 긴 것으로 밀 내의 볼은 입구에서 출구로 감에 따라서 직경이 순차적으로 작아지도록 배열되어 있다. 그러나 큰 볼이 출구로 치우치지 않도록 밀 내에 칸막이를 설치

표 3. 파쇄 및 분쇄 기기의 분류.

대분류	중분류	분쇄기기	
파쇄기 (crusher)	· 조쇄기 (coarse crusher)	· 조 크러셔(jaw crusher) · 선동파쇄기(gyratory crusher)	
	· 미조쇄기 (fine crusher)	· 롤파쇄기(crushing roll)	
분쇄기 (grinder)	· 중간분쇄기	· 해머밀(hammer mill)	· 보울밀(bowl mill)
		· 롤링압축밀 (rolling compression mill)	· 롤러밀(roller mill)
	· 미분말기 (fine grinder)	· 마모밀(attrition mill)	
		· 텀블링밀 (tumbling mill)	· 로드밀(rod mill)
· 페블밀(pebble mill)			· 튜브밀(tube mill)
· 칸막이 튜브밀(compartment mill)			
· 초미분쇄기 (ultra fine grinder)	· 내부선별기 부착해머밀(hammer mill with inter classification) · 교반식 밀(agitated mill) · Apex mill(attrition mill의 일종, 습식) · 제트 밀(Jet mill)		

하는 경우가 많다. 또 분쇄에 의해서 생성한 미분체가 많아짐에 따라서, 볼의 충격에 대해서 완화작용을 나타내게 되어 분쇄의 효율이 저하한다. 그 때문에 미분체를 제거하기 위해서 분급기와 분쇄기를 조합시켜 연속 분쇄를 실시한다.

최근, 시멘트공장에서는 튜브밀보다도 분쇄 효율이 높은 'Loshe mill' 사용이 증가하는 경향이 있다. 'Loshe mill' 은 중형의 롤밀로 그 기구에는 에지런너(edge runner)와 분급기를 하나의 용기에 넣는 형식으로 하부의 회전테이블과 그 위를 회전하는 롤러 사이에 원료가 물려 들어가 압축 미분쇄된다.

미분쇄물은 열풍으로 상부로 불어 올려져 세퍼레이터(separator)에서 분급되고 미분쇄물은 원래의 테이블에 낙하하는 구조이다. 시멘트공업과 같은 대량처리의 경우는 연속식 분쇄가 행해지는데 전자재료와 같은 소량처리와 순도 유지를 위해서는 회분식(回分式)이 행해지는 경우가 많다. 이 경우 일정량의 원료를 분쇄기에 넣어, 소요

입도에 달할 때까지 분쇄한다. 원료와 분쇄물의 취급에는 불편하지만 확실한 분쇄가 이루어지기 때문에 초미분쇄에서 자주 이용하는 방법이다. 파 · 분쇄기의 분류를 표 3에 나타내었다.

### 초미분쇄기

본 고에서는 파 · 분쇄 기기의 소개를 생략하고 최근의 초미분쇄 기기 몇 가지를 간단하게 소개하고자 한다. 초미분쇄의 기준으로서는 대략의 입자경이 10 $\mu$ m 정도인 원료를 1 $\mu$ m 이하로 분쇄한다. 주요한 것으로서 매체 교반형 분쇄기가 있다. 미분쇄기로서 소개한 유성 밀, 진동 밀도 분쇄조건에 따라 이 범주에 넣을 수도 있다. 교반형 분쇄기는 분쇄매체와 원료입자를 혼합, 교반함에 따라 충돌, 전단, 압축, 마쇄의 복합작용에 의해 분쇄가 행해지며 현재 분쇄 매체의 교반방법의 차이에 따라 많은 분쇄기가 개발, 사용되고 있다.

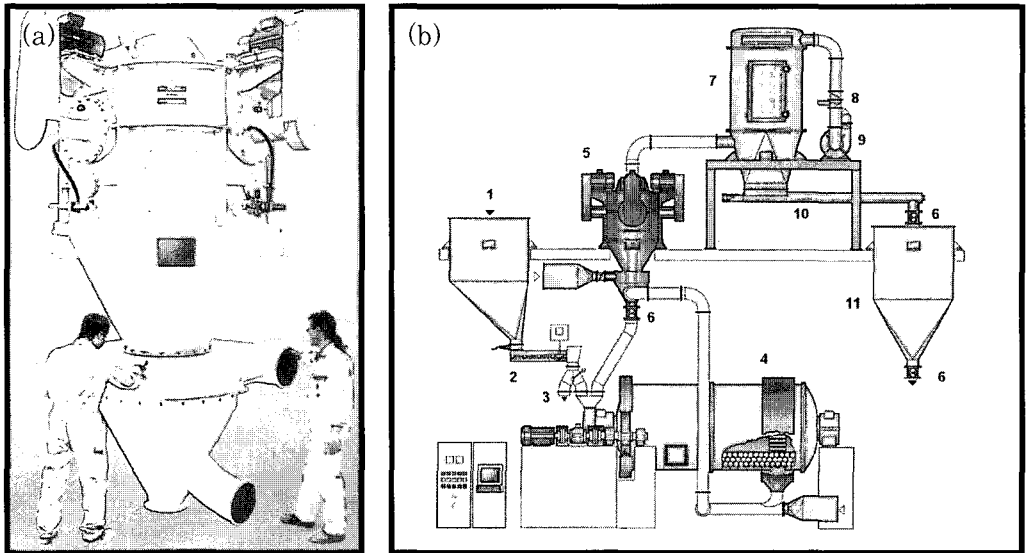


그림 2. (a) Turboplex multi-wheel classifier (b) 볼 밀과 분급기가 결합된 초미분쇄 흐름도.

1. feed bin, 2. Feeder, 3. Diverter flap, 4. Super Orion ball mill S.O.
5. Turboplex air classifier ATP, 6. Rotary valve, 7. Dust collector
8. Air flow control, 9. Fan, 10. Conveying screw, 11. Product silo

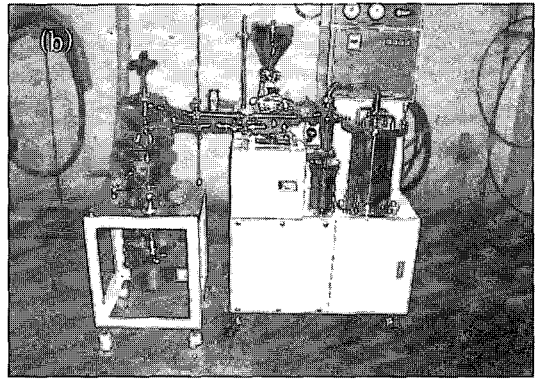
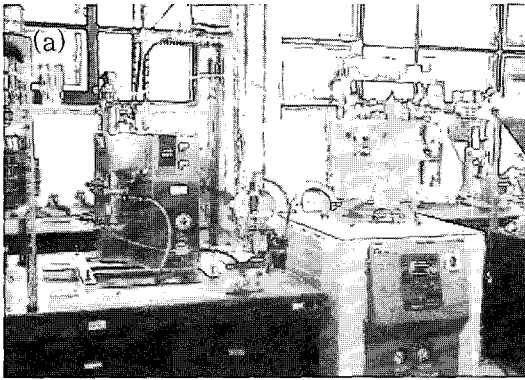


그림 3. 'Apex mill' (a)과 분급기가 결합된 'Jet mill' (b)의 외관.

분쇄는 단순히 고체의 파괴이기 때문에 많은 분쇄기가 개발되고 있으며 특히 입자경이 작아지는 미분쇄, 초미분쇄기에 그 경향이 두드러진다. 원료 입자경이 작아지면 입자경의 3제곱에 역비례하여 입자수가 증가하기 때문에 미분쇄, 초미분쇄기로 됨에 따라 단위시간 내에 많은 원료입자에 에너지를 가해주는 연구가 이루어지고 있다.

최근에는 용도에 따라 정확한 분급과 분쇄를 행하기 위하여 고성능 분급기와 분쇄기를 조합시킨 멀티(multi) 초미분쇄기가 다량 생산되고 있다. 그림 2의 (a)는 고성능 분급기이고 (b)는 볼 밀과 분급기(classifier)가 결합된 멀티 초미분쇄기의 흐름도의 한 예를 나타내었다.

또한 앞에서 서술한 분쇄 매체와 원료입자를 혼합, 교반함에 따라 충돌, 전단, 압축, 마쇄의 복합작용에 따라 분쇄를 행하는 교반형 분쇄기의 한 예를 소개하면, 일본 K사에서 제조한 'Apex mill'은 그림 3 (a)에서 보는 바와 같이 6000rpm까지 고속으로 교반하는 임펠러와 지르코니아 재질로 된 0.05~0.5mm의 비드(bead)를 사용하여 단시간에 sub  $\mu$ m까지 분쇄할 수 있으며 연속순환식으로 분쇄와 분산의 효과를 얻을 수 있는 기계이다.

또한 유체가 가지는 운동에너지를 이용해서 고압 노즐로부터 분출하는 압축공기 혹은 수증기로 생기는 제트 기류 속에 원료를 공급하여

입자 상호간의 충돌 혹은 벽면과의 충돌에 의해 분쇄가 진행되는 'Jet mill'이 있다. 본 회사에서는 그림 3 (b)와 같이 분급과 초미분쇄를 동시에 행하기 위해 분급기와 'Jet mill'이 조합된 멀티(multi) 초미분쇄기를 일본 S사에 제작 의뢰하여 용도에 따른 입도 제어가 가능한 초미분체 제조 연구를 시험 중에 있다

### 'Apex mill'을 사용한 초미분쇄 사례

대한광업진흥공사 기술연구소에서는 습식 초미분쇄기로 알려진 'Apex mill'을 도입하여 국내산 석회석에 대해 분쇄 정도에 대한 실험을 행하였으며 그 결과를 간단하게 소개하면 다음과 같다.

일본의 K사에서 제작한 습식 분쇄기인 'Apex mill'을 이용하여 아래의 조건에 대해서 석회석의 습식 분쇄 특성을 조사하였다. 샘플은 1차로 볼 밀을 이용하여 건식 분쇄하여 -325mesh로 제조하여 사용하였으며 실험 조건은 다음과 같다.

- 1) 비드(bead)의 크기 (0.3mm)
- 2) 회전수 (4000, 6000 rpm)
- 3) 'batch' 식으로 패스(pass) 횟수(1회~7회)

각 산물에 대해 입도 분석을 통해서 석회석의



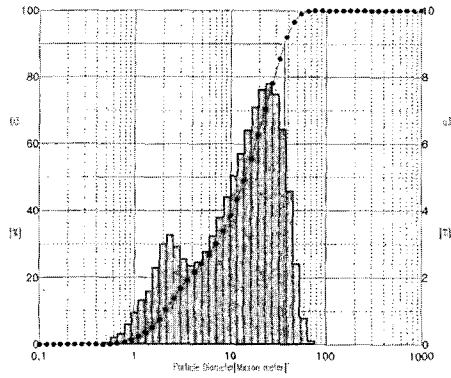
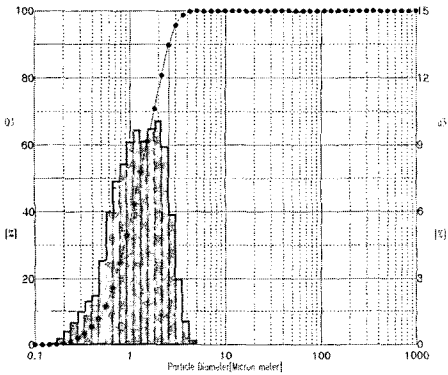
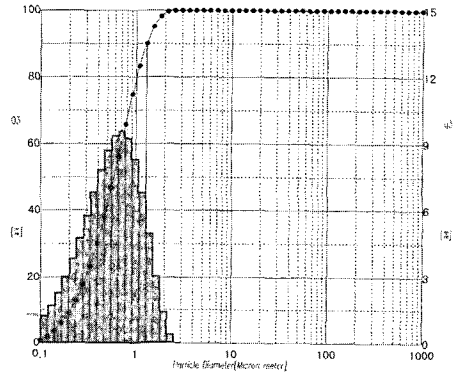


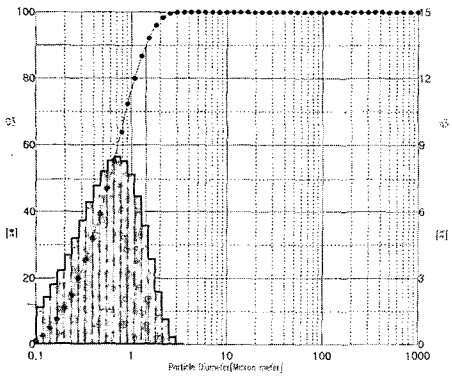
그림 4. -325 mesh로 건식 분쇄한 K광산 석회석 시료( $d_{50} : 14.335\mu\text{m}$ ).



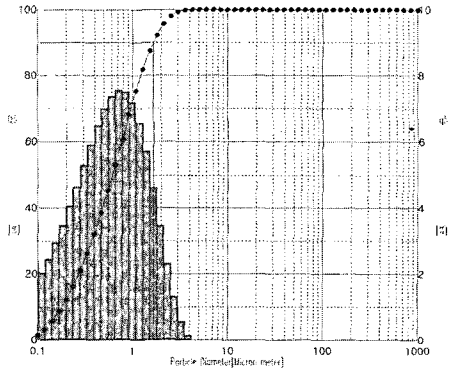
1 pass ( $d_{50} : 1.245\mu\text{m}$ )



3 pass ( $d_{50} : 0.583\mu\text{m}$ )



5 pass ( $d_{50} : 0.584\mu\text{m}$ )



7 pass ( $d_{50} : 0.608\mu\text{m}$ )

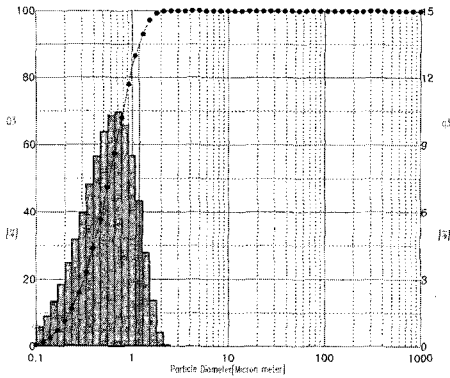
*conditions*

샘 플 : -325 mesh , pulp density : 20% , bead size : 0.3mm,

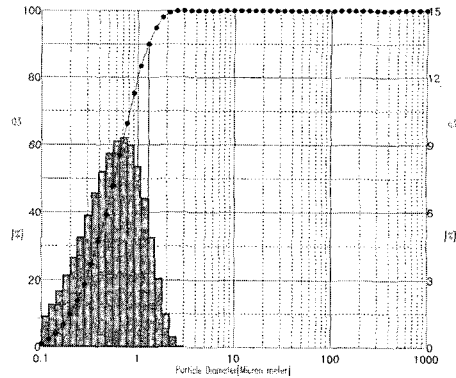
회전속도 : 4000 rpm , 급광량 : 200ml/min

그림 5. 경동 광산 석회석의 습식 분쇄 결과.

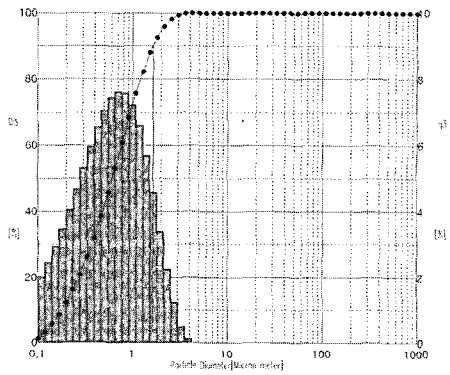
## 석회석의 분쇄 및 분쇄 장치



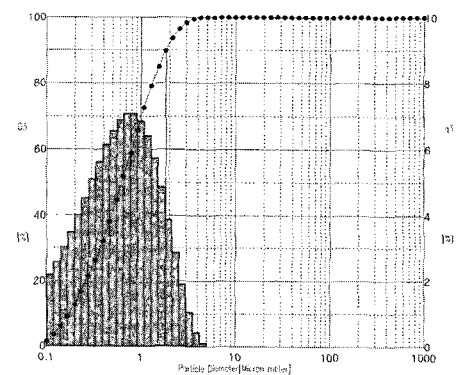
1 pass (d50 : 0.575 $\mu$ m)



2 pass (d50 : 0.572 $\mu$ m)



3 pass (d50 : 0.582 $\mu$ m)



4 pass (d50 : 0.606 $\mu$ m)

### conditions

샘 플 : -325 mesh , pulp density : 20% , bead size : 0.3mm  
회전속도 : 6000 rpm , 급광량 : 200ml/min

그림 6. 경동 광산 석회석의 습식 분쇄 결과.

습식 분쇄 능력을 측정한 결과는 다음과 같다. K 광산 석회석을 대상으로 0.3mm 비드를 사용하여 20%의 'pulp density'의 농도로 4000, 6000rpm의 회전속도로 패스 횟수별에 따른 습식 분쇄 특성을 살펴보았다. 그림 4는 'Apex mill'에 사용된 시료의 입도분포이며 평균입경은 14.335 $\mu$ m이다.

그림 5는 4000rpm의 조건에서 1회에서 7회 까지 반복하여 통과시킨 입도분포를 나타낸 것으로 3회 패스의 조건에서 평균 입도 0.583 $\mu$ m, 'Top size'는 2.55 $\mu$ m의 슬러리를 얻을 수 있었

다. 하지만 패스 횟수가 5회 이상의 경우에는 평균 입도와 'Top size'가 커지는 것으로 보아 입자 간에 응집이 되는 것으로 판단되었다.

그림 6은 6000rpm의 조건에서 1회에서 4회 까지 반복하여 통과시킨 입도분포를 나타낸 것으로, 1회 pass의 조건에서 평균 입도 0.575 $\mu$ m, 'Top size'는 2.55 $\mu$ m의 슬러리를 얻을 수 있었다. 하지만 패스 횟수가 2회 이상의 경우에는 그림 6의 결과와 마찬가지로 평균 입도와 Top size가 커지는 것으로 보아 입자 간에 응집이 되는 것으로 판단되었다.

그림 5과 6에서 보는 바와 같이 0.3mm 비드 (bead)를 사용하여 20%의 'pulp density'의 농도로 4000, 6000 rpm의 회전속도로 패스 횟수별에 따른 습식 분쇄 특성을 살펴본 결과 4000rpm에서는 5회의 패스에서 분쇄 효율이 좋았으며 6000rpm에서는 단 1회의 패스만으로 평균입경이 15 $\mu$ m 정도인 석회석 슬러리를 평균입경 0.5 $\mu$ m로 습식 분쇄할 수 있었다. 하지만 그 이후에는 평균입경이 커지는 것으로 보아 응집 현상이 일어나는 것으로 판단되었다.

따라서 향후 평균 입경을 낮추고 응집 현상이 최대한으로 일어나지 않도록 하기 위해서는 광 종별, 분쇄시간, 'pulp density' 조절, 회전속도, 'bead size'의 선택 및 분산재의 사용 유무 등의 여러 조건 변화에 따른 특성의 검토가 필요할 것으로 판단되지만 본 기기의 사용으로 평균 1 $\mu$ m 이하의 초미분체 제조가 가능한 것을 알 수 있었으며 향후 많은 응용이 기대된다.

## 참고문헌

1. 이강문, 1995, 광물처리공학, 반도출판사
2. 김상배 외, 2000, 비금속 판상광물의 미립화 및 고도선별 연구, 한국자원연구소
3. 양정일 외, 1997, 비금속광물의 부가가치 향상 연구, 한국자원연구소
4. 최신 분체기술핸드북, 1992, 대신기술
5. 채영배 외, 2000, 산업원료 광물의 부가가치 향상 기술 개발 연구
6. 吉田國夫, 1992, 鑛産物の知識と取引(工業用鑛物編)
7. Industrial mineral, 2005, September, No. 456
8. Peter w. Harben, 1999, The industrial Minerals Handybook(3rd Edition), Industrial Minerals Technology Ltd

석회석연구개발협의회 홈페이지

www.rdla.or.kr