

# 분쇄 (Comminution)

분쇄란 고체 입자에 힘을 가해 잘게 부수거나 잘라내어 작은 입자로 만드는 입도 감소를 의미한다. 고체를 잘게 부수는 목적은 고체의 표면적을 증가시켜 연소반응 속도를 높이고, 건조나 추출의 속도를 증가시키며, 입도를 작게 함으로서 고체의 혼합을 용이하게 하거나 분쇄의 색상을 개선하기 위함이다. 분쇄는 쇄제입자의 크기에 따라 조쇄, 중쇄, 미분쇄 등으로 구별되고, 1미크론 이하로 분쇄할 때 초미분쇄 (Ultrafine grinding)라고 한다. 분쇄는 오래 전부터 사용된 단위조작으로 많은 에너지를 소비하고, 효율이 현저하게 낮으며, 쇄제물은 통상 물성면에서도 불리함을 피할 수 없는 반면, 제조 cost가 비교적 싸고, 몇 가지의 분쇄법의 특징도 있기 때문에 능률 좋은 프로세스의 개발이 중요하다.

## 1. 분쇄 mechanism과 입도분포

### 1) 원리 및 mechanism

분쇄의 물성을 강하게 지배하는 것은 입자의 크기 및 분포로서 이상적인 분쇄기는 분쇄용량이 크고, 분쇄생성물의 단위량당 동력소모가 작아야 하며, 원하는 단일입자 또는 입도분포를 가지는 생성물을 얻을 수 있어야 한다. 그 때문에 단립자의 파괴의 mechanism은 분쇄의 기본이다. 분쇄공정의 성능을 연구하는 통상적인 방법은, 이상적인 장치조작을 표준으로 삼고 실제 장치의 특성을 이상적 장치의 특성과 비교하여 두 장치의 차이를 분석한다. 그러나 이러한 차이를 이론적으로 완전히 설명할 수가 없기 때문에 경험적인 연구에 의하여 부분적으로 분석되고 있다. 큰 고체에 가해지는 충격에너지가 크면 클수록 큰 입자의 수는 적어지고 작은 입자의 수는 많아지지만 작은 입자의 입도분포에는 한계가 있다. 이것은 분쇄되는 물질의 내부구조와 분쇄공정에 긴밀한 관계가 있기 때문이다. HeyWood는 석탄 분쇄실험에서 분쇄효과를 설명하면서 분쇄생성물의 입도분포를 분쇄기의 회전속도의 함수로 나타내었다. 또한 분쇄물의 표면은 구형이 아니고 매우 불규칙한 표면이기 때문에 돌출부에 큰 압력이 생기고 온도는 올라간다.

분쇄물에 힘이 작용하는 속도는 최대힘 부하를 얻는 시기와 파쇄가 일어나는 시기 사이의 시간지연을 일으키므로 분쇄과정에서 중요하다. 즉 분쇄공정에 부하가 가해지는 속도가 크면 클수록 분쇄에너지는 덜 효과적이고, 분쇄생성물의 미분말 분율은 높아진다.

### 2) 입도분포

입자크기가 고르지 않은 범위 내에서는 크기분포가 똑같이 적용되지 않는다. 그러나 미세 입자의 경우,  $\Phi$ 대  $D_p$  그래프의 기울기가 입자직경  $D_p$ 의 지수함수라는 것이 실험적으로 밝혀졌다.

$$-\frac{d\Phi}{dD_p} = BD_p^k \quad (1-1)$$

이 식은 입자가 너무 미세하여 정확한 측정이 곤란한 경우의 체분석에 사용된다.

적분 및 치환하면

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \frac{B}{k+1} (D_{p1}^{k+1} - D_{p2}^{k+1}) \quad (1-2)$$

상수  $k$ 는 대부분의 분쇄 제품의 경우 약  $-0.5 \sim 0.1$ 의 범위를 갖는다. 상수  $B$ 와  $k$ 는 미분체분석으로 구

할 수가 있는데  $D_{pn}$ ,  $D_{p(n-1)}$ 이 각각  $n$ 번째와  $(n-1)$ 번째 체의 mesh 크기라면  $n$ 번째 체의 질량분율은  $\Phi_n - \Phi_{n-1}$ 이므로

$$\Phi_n - \Phi_{n-1} = \Delta\Phi_n = \frac{-B}{k+1} (D_{pn}^{k+1} - D_{p(n-1)}^{k+1}) \quad (1-3)$$

$D_{p(n-1)}$ 과  $D_{pn}$  사이의 일정비율이  $r$ 이라면

$$D_{p(n-1)} = rD_{pn} \quad (1-4)$$

$$\Delta\Phi_n = \frac{B(r^{k+1} - 1)}{k+1} D_{pn}^{k+1} = B'D_{pn}^{k+1}, \quad B' = \frac{B(r^{k+1} - 1)}{k+1} \quad (1-5)$$

$$\log \Delta\Phi_n = (k+1) \log D_{pn} + \log B' \quad (1-6)$$

상수  $B'$ 와  $k$ 는 대수좌표상에서  $\Delta\Phi_n$  대  $D_{pn}$ 을 플롯하여 각 점들을 통과하는 가장 곧은 선을 그려서 계산한다.

결과적으로 비표면적  $A_w$ 에 대한 식은

$$\therefore A_w = \frac{-6B}{\Phi_{sp}} \ln \frac{D_{pl}}{D_{pl}^2} \quad (1-7)$$

단위 질량당 입자수  $N_w$ 는

$$\therefore N_w = -\frac{B}{a\rho_p} \int_{D_{pl}}^{D_{pl}^2} \frac{dD_p}{D_p^{3-k}} = \frac{B}{(2-k)a\rho_p} \left( \frac{1}{D_{pl}^{2-k}} - \frac{1}{D_{pl}^{2-k}} \right) \quad (1-8)$$

한편, Gilvarry는 활성화의 확률이 Poisson 분포에 따른다고 하고, 이들의 균열이 발전해 충돌해서 생성하는 파편의 크기( $x$ )의 분포를 이론적으로 구하였다. (이 때 체적  $V$ (대표경  $y$ )인 단립자에 힘이 작용해 변형이 일어나고, 고체 내의 microcrack이 활성화되고, 탄성에너지는 이들의 균열에 집중해 파괴 임계점에 달한다.) 이러한 조건에서 단립자 파괴 결과의 체하  $B(y, x)$ 는 다음 식과 같다.

$$B(y, x) = 1 - \exp\left[-\frac{x}{\xi} - \left(\frac{x}{\eta}\right)^2 - \left(\frac{x}{\zeta}\right)^3\right] \quad (1-9)$$

단,  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ 는 정수이다. 똑같은 연구 경로가, 다음 식도 유도되어 있다.

$$B(y, x) = 1 - \left[1 - \frac{x}{y}\right]^y \quad (1-10)$$

$$B(y, x) = [1 - \exp(-\frac{x}{y})]/[1 - \exp(-1)] \quad (1-11)$$

$\gamma$ 는 파편의 수이다. 이것들은 분쇄속도론에서 파쇄함수(Breakage function)라 불리는 중요한 인자로 작용된다.

## 2. 분쇄의 이론과 실제

분쇄는 화학공학에 있어서 중요한 단위조작인데 입경이 감소하기 때문에 어떻게 하면 효율적으로 분쇄할 수 있겠는가에 연구가 집중되어 있어, 분쇄됨에 따라서 분쇄물 그 자체의 물리화학적 성질이 변화해 가는 현상에 대해서는 오랫동안 연구가 이루어지지 못했다.

분쇄의 흡착성과 반응성의 증대에는 고체의 표면적이 관여하고 있다. 비표면적이 증대하면 세라믹스 원료에서는 고상반응의 속도를 촉진시킬 수가 있고, 안료와 도료에서는 매질 중에 균일하게 분산되어 늘어남과 퍼짐을 향상시킬 수 있다. 비표면적이 증대함에 따라 석영의 용해성이 향상한 예를 그림 1.에 나타내었다.

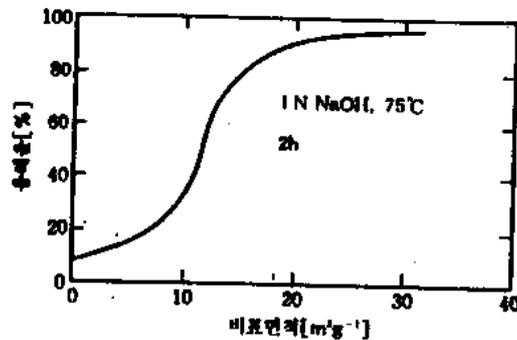


그림 1. 석영의 비표면적과 용해성(R. Schrader, 1968년)

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.

$$E = k(S - S_0) \quad (1-12)$$

리팅거식 직선의 기울기  $E/S$ 는 리팅거 수(R수)라 하고, 광물등의 분쇄하기 쉬움성의 척도가 되어 있다. 로스(Rose)는 진동 불 분쇄에 의한 분쇄저항(석영을 1.0으로 하는 상대치)과 모스경도가 그림 2.에 나타낸 바와 같은 관계가 있다고 보고하고 있다. 한편, 비표면적의 증대는 표면에너지의 증대와 관계가 있다. 쿠즈네토프(Kuznetov)는 분쇄방법이 같으면 각각의 고체의 표면에너지에 비례한 분쇄량이 얻어진다고 하여 경도와 표면에너지와의 관계를 나타냈다.

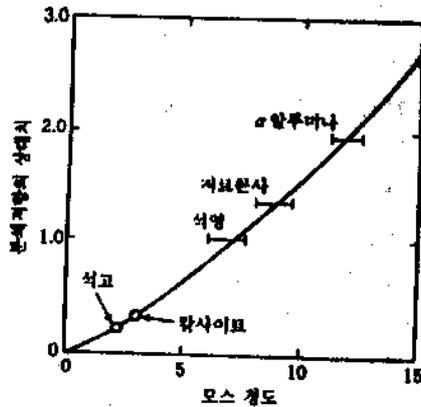


그림 2. 광물의 경도와 분쇄저항

그림 2와 앞의 관계를 종합하면 R수도 상대적으로 표면에너지를 나타내는 수치로서 취급할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 표면에너지는 경(硬)할수록 크고, 무른 것일수록 작다.

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

$$\gamma^n = \frac{S_0}{S} \quad \text{또는} \quad n \log \gamma = \log \frac{S}{S_0} \quad (1-13)$$

1단계에 요하는 에너지를  $E_1$ 이라 하면 전에너지 E는 다음과 같이 나타내어진다.

$$E = nE_1 = \frac{E_1}{\log \gamma} \log \frac{S}{S_0} \quad (1-14)$$

여기에서  $W_1$ 과  $\gamma$ 은 각 단계에서 일정하기 때문에 다음의 식과 같이 되고, 분쇄일량은 입자 증가분의 대수에 비례하는 것으로 하고 있다.

$$E \propto \log \frac{S}{S_0}, \quad W = k \log \frac{S}{S_0} \quad (1-15)$$

화학공학에서는 분쇄를 파쇄(crushing)와 분쇄(grinding)로 크게 나누어 고려하고 있는데 파쇄에는 킁의 식, 분쇄 내지 미분쇄에는 리팅거의 식이 일치한다고 알려져 있다.

일반적으로 분쇄가 진행됨에 따라서 리팅거의 직선관계는 점차로 이탈하여 분쇄의 효율은 빠르게 저하하고, 결국에는 어느 정도 분쇄에너지를 투입해도 표면적의 증가는 전혀 보이지 않는 상태가 된다. ( $dS/dE=0$ ). 그래서 그후의 분쇄에너지는 오로지 입자의 운동이나 마찰, 결정격자 내의 함유량의 증대에 쓰여지게 된다. Tanaka는 이 경우의 한계 비표면적을  $S_\infty$ 로 하고, 그것과 비표면적 S와의 차가 분쇄속도를 정한다고 가정하여 다음과 같은 식을 제안했다.

$$\frac{dS}{dE} = k(S_\infty - S) \quad (1-16)$$

이 식을  $S_0$ 에서 S까지 적분하면 다음 식이 된다.

$$\ln \frac{(S_\infty - S_0)}{(S_\infty - S)} = KE \quad (1-17)$$

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

$$S = S_{\infty}(1 - e^{-KE}) \quad (1-18)$$

즉, 분쇄중의 비표면적의 변화는 에너지의 지수함수로 나타낼 수 있다. 여기에서 K는 분쇄물의 성질과 분쇄조건에 의해서 정하는 분쇄계수이다.  $S_{\infty} - S$ 가 작을수록 분쇄는 한계에 가까워진다. 그 원인으로서는 미립자간에 작용하는 반데르발스 힘이나 정전기력 등에 의한 입자의 응집, 입자표면의 격자 혼란에 의한 응력의 완화가 고려된다. 리팅거, 킥, 타나카의 식을 각각 그림에 나타내면 그림 3과 같이 된다.

그림 4는 Arai 등의 보고에 의한 것으로 돌로마이트의 유발분쇄에 있어서 마쇄시간 t와 비표면적 S의 관계를 나타내고 있다. 분쇄에너지 E는 시간 t와 대응하기 때문에 본질적으로는 그림 3의 E~S곡선과 같다고 보아도 좋다. 이 그림은 t-S곡선과 함께 t-ε(격자 스트레인, Xijs 회절에 의한 측정치)곡선도 같이 나타내고 있다. 유발마쇄는 전단응력을 주체로 하기 때문에 에너지는 비표면적 증대 이외에 격자의 변형에 쓰여져 t-S곡선은 현저히 완곡하여  $S_{\infty}$ 에 달하고 그후의 에너지는 오직 격자 스트레인의 증대에 이용되고 있다.

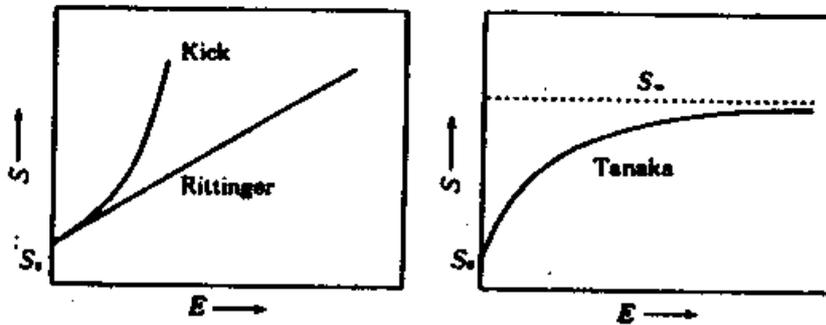


그림 3. 분쇄에너지 E와 비표면적 S

리팅거 이후 분쇄의 일량은 분쇄량의 증대에 정비례하고, 표면적의 증가만이 분쇄의 일량을 규정하는 것으로 알려져 왔는데, 새로운 표면의 생성뿐 아니라 분쇄입자 자체의 표면이나 내부까지 미치는 구조변화를 무시할 수가 없게 되었다. 이렇게 해서 격자내에 축적된 에너지가 결정의 변화에 필요한 에너지에 달하면 앞에서 서술한 칼사이트→아라고나이트 전이와 같은 현상이 나타나는 것이다. 분쇄와 같이 힘으로 가해진 기계적 에너지에 의해서 고체물질 갖는 물리화학적 성질에 변화를 일으키는 현상은 메카노케미칼 효과로서 주목되고 있다.

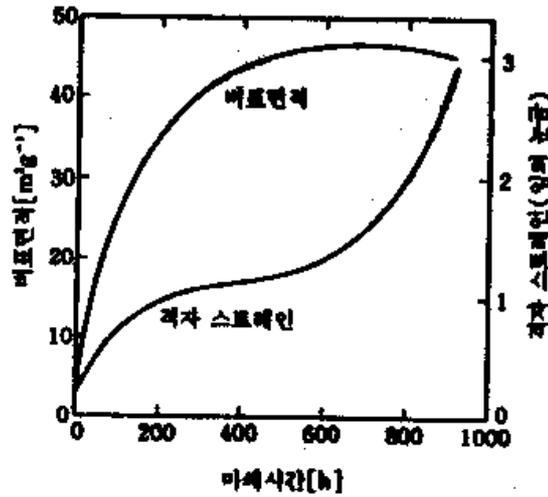


그림 4. 분쇄에 의한 돌로마이트의 비표면적 변화와 격자 스트레인의 발생

이미 서술한 바와 같이 화학공학적으로는 얼마나 효율 높게 분쇄되는가가 중요시된다. 그러나 Tanaka의 식에서도 알 수 있는 바와 같이 미분쇄 공정은 한계치  $S_{\infty}$ 에 달

하면 효율은 현저히 저하한다. 분쇄물의 종류에 따라서는 일단 분쇄에 의해서 생긴 새로운 표면은 정전기력이나 반데르발스 힘에 의해 다시 결합하여 비표면적이 감소하는 경우도 있다. 분쇄의 효율을 높이는 데는 이러한 표면끼리의 재결합 즉, 입자의 부착을 피하는 것이다. 분쇄 조제는 이러한 목적으로 분쇄물에 첨가되는 것으로 에테르, 알코올, 트리에탄올아민, 리그닌술포산, 스테아린산 등의 액체는 새로운 표면에 분자 흡착함으로써 부착방지의 효과가 있다고 한다. 물에 녹이거나 물과 반응하지 않는 분쇄물이라면 물을 첨가하여 입자의 분산성을 높이는, 소위 습식분쇄도 효과가 있다. 단, 부착수분 정도의 물로는 오히려 분쇄기 내에 부착하여 완충작용을 하여 효율은 저하한다. 다량의 수중에 분산하면 부착하지 않고 미분쇄가 될 수 있고, 게다가 입도분포가 좁고, 분급도 쉬운 이점도 있다. 단, 건조할 때 다시 부착하는 것이어서는 안 된다.  $\alpha$ -알루미나의 분쇄 예를 그림 5에 나타내었다.

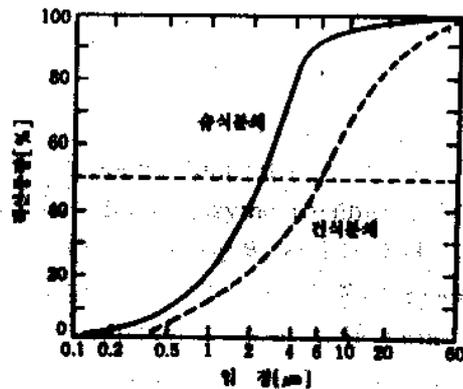


그림 5.  $\alpha$ - $Al_2O_3$  분쇄의 입도분포

어떠한 경우에도 미분쇄에 있어서는 분쇄물과 분쇄기의 조합으로 한계입경이 정해지는 것으로 이보다 미세한 입자는 얻을 수 없다. 그러면 일체분쇄의 한계입경은 어느 정도일까? 튜브밀에 의한 시멘트의 분쇄에서는 그의 한계치는 비표면적  $4.350cm^2g^{-1}$ (비표면적으로 환산한 경우 약  $6\mu m$ )으로 알려져 있다.

분쇄기를 바꾸면 한계치도 당연히 변화하는데 분쇄에 의한 한계치는  $1\mu m$ 부근 정도라는 게 일반적인 것 같다. 문제는  $1\mu m$ 이하의 서브마이크론 분쇄에의 도전인데 진동분, 제트밀을 이용하여 질화규소( $Si_3N_4$ )의  $0.5\mu m$  부근의 분체를 얻었다는 보고 예도 있다. 어느 것이나 에너지 효율이라는 면에서 논의가 되고 있는 것이다.

마지막으로 분쇄에 의해서 얻어지는 분쇄제품의 분쇄소요 동력  $E_M$  과 분쇄물입경  $x_{50}$ 의 관계도를

그림 6.에 나타냈다.

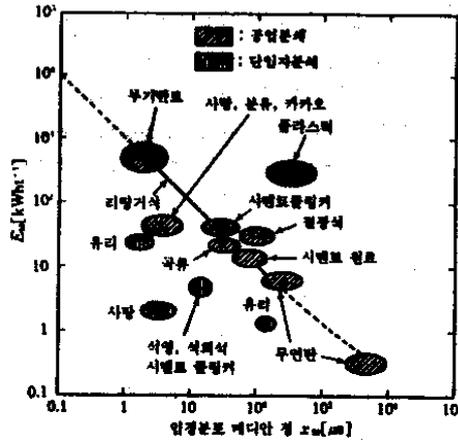


그림 6. 공업분쇄와 단입자 분쇄의 소요에너지

여기에서  $x_{50}$ 은 입경분포(중량기준)에서 얻은 메디안경이다. 이러한 관계는 리팅거의 관계식과 어떠한 관계가 있는 것 같아 흥미가 깊다. 단입자 분쇄의  $E_M$  은 힘을 가하는 방법이 적정하게 적용되고 있기 때문인지 공업용 분쇄의  $E_M$  과 비교해서 1~2자리 수나 작다.

### 3. 고체의 강도와 분쇄의 물리화학

일반적으로 고체의 강도에 따라 분쇄기는 선정된다. Mohs 경도가 4이하인 물질은 연한 물질, 5이상의 물질을 딱딱한 물질로 구분하는 것이 보통인데, 이 경도는 물질의 강도에 크게 관계있다. 분쇄의 메카니즘은 압축, 마모, 충격, 절단 등에 의해서 영향을 받는 동시에 물질의 굴절, 비틀림 등에도 영향을 받는다. 여러 물질의 경도를 표.(1-1)에 나타내었다.

표(1-1). 고체의 경도

광물명칭	Mohs 경도
활 석(talc)	1
석 고(gypsum)	2
석 회(calcite)	3
형 석(fluorite)	4
인 회 석(apatite)	5
장 석(feldspar)	6
석 영(quartz)	7
황 옥(topaz)	8
강 옥(corundum)	9
다이아몬드(diamond)	10

분쇄물이 함유하는 수분함량도 역시 분쇄에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 분쇄물의 강도는 수분함량의 증가에 반비례하여 감소한다.

Yashima 등의 측정에 의하면 재료의 구압계강도는 표(1-2)에  $S_s$  ( $\text{Kg/cm}^2$ )의 기호로 표시한 바와 같이 되어, 입경이 작을수록 마이크로크래크가 적음을 나타낸다. 그 균열이 확대할 때의 표면에너지의 증대가 변형에너지와 같다고 한다면, 파괴의 임계응력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma \approx \sqrt{2Y\lambda/\pi c} \quad (1-19)$$

- $\lambda$  : 표면 에너지
- $c$  : 임계점의 균열의 길이의 반
- $Y$  : Young을

만약 균열이 없고 균일하게 된다면, 최대강도  $\sigma_m$  은 이론적으로

$$\sigma_m \approx \sqrt{Y\lambda/a} \quad (1-20)$$

표(1-2). 구압쇄강도 강도의 크기 효과

쇄 료	구압쇄 강도		강 도 비
	직경 $5 \times 10^{-5}$ m	직경 $2 \times 10^{-2}$ m	$S_1 / S_2$
호우케이산 글래스	$1.08 \times 10^9$	$4.70 \times 10^7$	22.9
석 영	$4.90 \times 10^8$	$9.80 \times 10^6$	50.5
장 석	$2.35 \times 10^8$	$6.86 \times 10^6$	34.3
석 탄 석	$9.31 \times 10^7$	$4.41 \times 10^6$	21.1
대 리 석	$8.82 \times 10^7$	$2.45 \times 10^6$	36.0
석 고	$4.41 \times 10^7$	$2.65 \times 10^6$	16.7

$a$ 는 격자정수이고, 통상  $\sigma$ 는  $\sigma_m$  에 비해 2자리 정도 작다.

실제  $a$ 의 작은 다른 물질과의 이온교환에 의해 미소한 균열을 고체 내에 발생시켜, 파괴강도를 격감시켰던 예가 있다. 또 이들의 식에 있어서의  $\lambda$ 을 감소시키면 강도가 감소되고 분쇄는 촉진된다. 이 원리는 옛날부터 습식분쇄에 이용되어 같은 쇠료에 대해 수중에서의 강도는 작다. 한편, 표면활성제를 첨가하면 흡착에 의해, 따라서  $\sigma$ 가 감소하여 소위 Rehbinder 효과가 확인되는 계도 있다. 이들을 분쇄조제 (Grinding aid)라 하고, 분쇄매체의 완충을 피해, 분쇄시의 응력저하나 분체의 재응집을 막고, 분급의 개선에도 도움이 되는 것으로, 분쇄속도를 크게 개선한 예가 보고되고 있지만, 적량이 틀리게 되면 역효과도 있을 수 있다.

이와 같이 분쇄 직후의 활성화한 표면에는 보다 강고한 화학결합이 일어나기 때문에, 분쇄조제는 고체표면의 개질제로도 되고, 젖음, 분산성, 용해성 등의 개량을 목적으로 한 미립자의 복합화, 마이크로 캡셀화 등에도 이용된다. 또 분쇄 시에 가해졌던 대량의 에너지의 일부는 고체 내에 축적되어, 결정의 구조부정이나 무정형화 등의 물질 변화를 일으키고, 그 활성화에 의해 반응성이 높아진다. 이와 같은 메카노케미칼반응은 유기물, 무기물 모두 보고되어 있고, 더욱이 이종물질의 표면피복에 의한 복합화, 금속의 아말화스 합금이나 유기물 중합반응 등에도 응용되고 있다. 또 극저온에 의해 쇠료의 취성을 높이는 저온분쇄도 물리화학적 분쇄 촉진법의 일례이다.

#### 4. 분쇄 소요 에너지

분쇄와 미분쇄에 소요되는 비용 중에 동력비의 비중이 크므로 이들을 조정하는 인자가 매우 중요하다. 크기 축소를 하는 동안 공급된 원료 입자는 먼저 변형된다. 이 때 소요되는 일은 마치 스프링 코일 내에 역학적 에너지가 저장되듯이 일시적으로 응력이라는 역학적 에너지로 입자내에 축적된다. 늘려진 입자에 힘이 더욱 부가되면 변형 한계를 넘어 마침내 조각조각 부서져서 새로운 표면이 생긴다. 고체의 단위 면적은 일정량의 표면에너지를 가지므로 새로운 표면의 생성은 일을 필요로 하며, 그 일

은 입자가 부서질 때 응력에너지를 방출에 의해 이루어진다. 새 표면에너지를 형성하고 남은 모든 응력에너지는 열로 사라진다.

분쇄를 위해서는 고체입자에 외력을 가하여 내부에 인장(또는 압축)과 전단과 같은 응력을 발생시킨다. 이 파괴를 일으키는 한계응력 즉, 파괴응력  $\sigma$ 는 영률 E와 관계는 갖는다.

$$\sigma \approx \sqrt{E\gamma/r} \quad (1-21)$$

- 파괴강도  $\sigma$
- 표면에너지  $\gamma$
- 영률 E
- 원자간 거리 r

고강도이기 위해서는 강한 결합을 고밀도에서 가질 필요가 있다. 각종 재료의 영률을 표(1-3)에 나타냈다.

계산에 의한  $\sigma$ 의 값은 거의 E/10에 상당하는데, 이것은 완전한 결정을 가정한 경우로서 세라믹스의 경우는 다결정이고 입계나 공공이 존재하기 때문에  $\sigma$ 는 E/10보다도 훨씬 작아져서 E/1,000정도가 된다. 단결정의 경우에도 표면에 작은 균열이 존재하면  $\sigma$ 에 큰 영향을 미친다. 이러한 현상을 구조 민감성(structure sensitivity)이라 부른다. (1-21)식에서 더욱이 공공이나 균열을 고려하여 유도한 식이 (1-22)이다.

$$\sigma = \sqrt{E \frac{(\gamma + P)}{L}} \quad (1-22) \quad (\cdot P : \text{표면소성의 일} \quad \cdot L : \text{표면 균열의 깊이})$$

표(1-3). 각종 재료의 영률(실온)

재 료	영 륭[kPa]	재 료	영 륭[kPa]
Cu	11300	MgO	21000
Al	7130	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	24000
$\alpha$ -Fe	21500	ZrO <sub>2</sub>	19000
Pb	1600	석영 유리	7300
흑 연	3060	나이론(6-6)	367
WC	64800	폴리에틸렌	774
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38800	고 무	0.1

금속에서는 P의 영향이 세라믹스에서는 L이나  $\gamma$ 의 영향이 커진다.

분쇄를 위해서 분쇄기에 공급한 에너지의 합계를 분쇄에너지라고 부른다. 이중의 일부는 증가한 표면적에 표면에너지나 격자결합의 비틀림에너지 등으로서 변환 축적된다. 지금 분쇄비  $\gamma$ , 분쇄물질량의 80%가 체를 통과했을 대의 입경을  $d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ 단위의 크기)라 하면, 이에 요하는 분쇄에너지 E는 (1-23)식으로 나타내어진다.

$$E = Ei \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\gamma}}\right) \sqrt{\frac{100}{d_{80}}} [kWh t^{-1}] \quad (1-23)$$

이 Ei는 무한대의 입자를 100 $\mu\text{m}$ 까지 분쇄하는 데 요하는 일을 kWh t<sup>-1</sup>로 나타낸 일 지수라고 하는 특

성치로서, 그 대소는 분쇄기와 분쇄방법에 따라서 다소 변동하는데 분쇄의 난이의 척도가 되고 있으며 Mohs 정도 순으로 대응하고 있다. 분쇄하는 조작은 극히 큰 동력소비를 동반하여 그 에너지 효율이 매우 작아 수% 이하라는 사실은 널리 알려져 있다. 즉, 대부분의 동력은 열이라는 형으로 아주 낭비 되는 것이다.

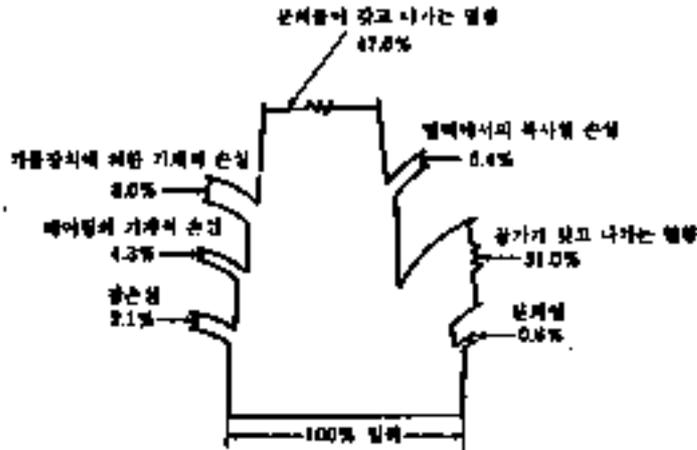
그림 7은 진동분밀에서 측정된 분쇄의 열수지의 한 예인데 대부분은 분쇄물이나 배기가 갖는 열량으로 변하여 분쇄를 위해서 소비된 열량은 겨우 0.6%에 지나지 않는다.

즉 동력에 의해 가해진 기계에너지의 대부분은 분쇄물들끼리, 분밀들끼리 불과 벽 사이의 충돌이나 마찰에 의해 열에너지로 변환되어, 분쇄물과 배기에 의해서 외부로 확산되고 있는 것이다. 이외에 많은 연구자에 의한 값도 소개되고 있는데, 어느 것이다 1%이하의 낮은 값이다.

일반적으로 분쇄기의 분쇄효율  $\eta$ 는 다음과 같은 식에서 구해진다.

$$\eta = \frac{\Delta S_{\gamma}}{E} \times 100 \quad (1-24)$$

- $\Delta S$  : 분쇄에 의해서 새롭게 생성된 표면적
- $\gamma$  : 표면에너지
- $E$  : 분쇄를 위해 가해지는 전 에너지



분쇄는 새로운 표면을 생성하고, 표면 에너지의 증가가 분쇄 일량이라는 인식이 원래의 Rittinger (1867)의 법칙으로, 단위질량의 일  $W$ 는 비표면적 증가에 비례한다. 이 법칙은 분쇄 효율은 일정하며 기계화 원료가

정해졌을 때 원료와 제품의 크기에는 무관하다.  $x_1, x_2$ 를 각각 쇄료, 쇄제물의 대표경으로 하고,  $R=x_1/x_2$  (분쇄비, Reduction ratio)로 하면

$$W \propto \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) = \frac{1}{x_2} \left( 1 - \frac{1}{R} \right) \quad (1-25)$$

그림 7. 분쇄기의 열량 수지 예

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

$$W \propto \log R \quad (1-26)$$

이것을 미분식으로 쓰면,  $dW \propto (-dx/x^n)$  로 되고 n=2에서 Rittinger, n=1에서 Kick의 법칙이 된다. Bond(1952)는 n=1.5를 택해서 제3법칙을 제창했다. 분쇄와 미분쇄에 필요한 동력을 계산하는 최신 방법이 Bond에 의해 제시되었다. 약간 추론적인 이론에 근거한 Bond의 법칙은, 매우 큰 원료를 크기  $D_p$ 의 입자로 만드는데 필요한 일은 제품의 표면적대 부피의 비( $s_p/v_p$ )의 제곱근에 비례한다는 법칙으로서  $s_p/v_p=6/\Phi_s D_p$ 이므로

$$\frac{P}{\dot{m}} = \frac{K_b}{\sqrt{D_p}} \quad (1-27)$$

$K_b$ 는 기계의 종류와 분쇄 원료에 의존하는 상수이며, 이 법칙은 Rittinger의 법칙에 비하여 작은 입자를 생성할 때 적용되며, 비교적 적은 에너지를 요구한다. Bond의 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  $D_{pa}$  mm를 통과하고, 제품의 80%가 mesh 크기  $D_{pb}$  mm를 통과한다면,

$$\frac{P}{\dot{m}} = 0.3163 W_i \left( \frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}} \right) \quad (1-28)$$

여러 가지 쇄료에 대해 많은 분쇄기의 실측치에 근거하는 평균치로서 계산된 것으로 표(1-4)에 나타난다. 건식분쇄에는 표의 값에 4/3를 곱한다. Bond의 법칙은 공업용의 분쇄기나 미분쇄기의 동력소요량을 계산하는 데 실제적으로 적용된다.

표(1-4). 분쇄의 Work Index

Material	Sp. gr.	Work Index (W <sub>i</sub> )
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

## 5. 분쇄기의 에너지측과 분쇄효과

제3법칙 이전에도 Bond 등은 여러 가지의 분쇄기에 의해 다음 식을 주었다.

$$h = K \sqrt{\frac{R^{1/2}}{x_p}} \quad (1-29)$$

h는 분쇄일 (HPh/short ton), K는 정도에 따른 정수로 1,1/2, 1/4이고, R은 분쇄비, P는 쇄제물 80% 통과 체눈크기(inch)이다.

Rittingerd의 법칙은 표면 에너지에 근거하고 있지만, 실제의 분쇄기에 필요한 에너지는 이론치의 100~1000배에 달하며, 그 대부분은 열로 된다. 그러나 중추낙하 충격분쇄에 의해 생겨난 단위면적당 분쇄 에너지(분쇄저항이라고 정의)를 물질 상호간에 비교하면 그림 8.으로 되고, 정도나 비중과의 관계가 최근의 마쇄에 의한 초미분쇄기의 경우라도, 그림 9.처럼 똑같이 얻을 수 있다. 이렇게 너무 낮은 분쇄효율의 개선에는 앞에 기술한 물리화학적 방법과 함께 분쇄기 내의 입자의 거동, 역학적 조건, scale-up, 더욱이 합리적인 조작설계 등에 머리를 짜내는 것을 요한다.

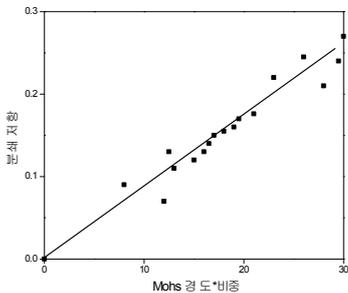


그림 8. 분쇄저항과 입자물성

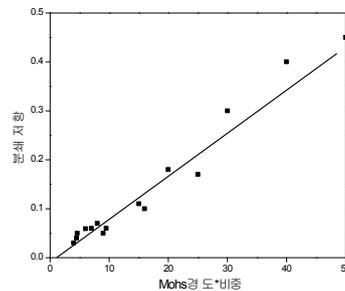


그림 9. 분쇄저항과 입자물성

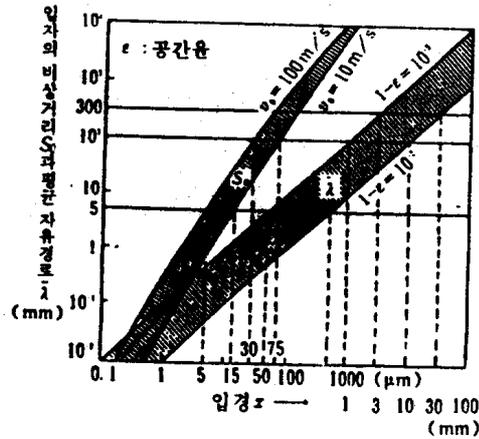


그림 10. 입자의 비상거리  $S_0$ 와 평균자유경로  $\lambda$

예를 들면 충격식의 미분쇄기에서는 입자끼리가 빠른 속도로 충돌하는 확률을 크게 할 필요가 있다. 입자가 초속  $V_0$ 를 주어져 날아, 다른 입자와 충돌을 위해서는 그 비행거리  $S_0$ 가 입자간의 평균자유경로  $\lambda$ 보다 클 것이 필요하다. 그림 10.에 나타낸 것처럼 양자가 똑같이 되었을 때 충격력이 0으로 되고, 분쇄는 사실상 일어날 수 없다. 통상 충격식 분쇄기에서는  $v_0 \leq 100 \text{ m/s}$ 에서 분쇄 가능역은 수 미크론까지이다.

최대충격응력  $\sigma_{\max}$  는

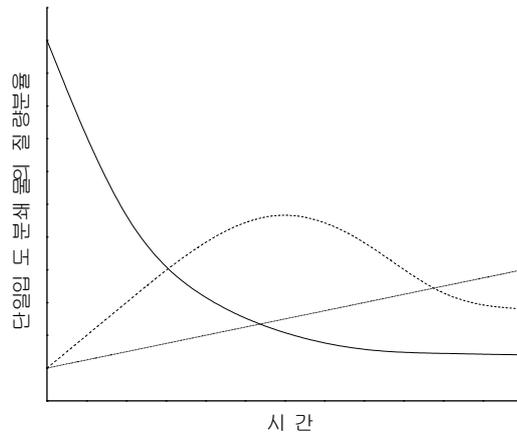
$$\sigma_{\max} \propto m^{1/5} \cdot v^{2/5} \cdot r^{-3/5} \cdot Y^{4/5} \quad (1-30)$$

- $m$  : 입자질량
- $v$  : 속도
- $r$  : 충돌점의 곡률반경
- $Y$  : Young률

이 때문에 플라스틱의 분쇄에는  $r$ 이 작은 cutter mill이 유효하다. 젯트 mill은 젯트에 입자를 빨아 들여 충분히 가속해 충격력을 증가시키고, 어느 정도의 대형화도 기대된다. 일반적으로 초미분쇄를 행하기 위해서는 마쇄 (Attrition)에 의한 것이 효과적이라고 한다. Ball mill나 매체교반 mill 등 분쇄매체 (Grinding media)를 사용하는 장치는 많지만, 최근에는 직경 0.3 mm 정도의 작은 매체를 사용해 초미분쇄에 성공한 예가 많다. 동체마찰에 의한 미립자 생성속도는 마찰면 압력  $P$ 와 미끄럼 속도  $v$  등의 함수로 주어진다. 또, 에너지 효율적으로도 마쇄가 유리하다는 점이 지적되고 있다.

## 6. 분쇄속도론 (Kinetics of comminution)

회분식 분쇄공정에서 분쇄장치에 들어가는 원료의 입도가 균일한 것만으로 되어 있다면, 분쇄시간이 경과함에 따라서 분쇄물의 입도분포는 계속하여 변화할 것이며, 그 입도분포는 정성적으로 특징지어진다. 즉 어떤 분쇄기에서는 입도가 작아지면 그 이상 분쇄가 되지 않고 양만 많아질 것이다. 실제로 분쇄가 시작되면 원료는 파쇄되는데, 처음에는 장치 내에 없었던 중간입도의 분쇄물이 증가하고, 시간이 지나면 중간입도 분쇄물의 분율은 차츰 감소한다. 전체분쇄과정이 진



행되는 동안에 이러한 변화는 어느 특정한 분율의 중간입도 분쇄물이 남을 때까지 계속된다. 동시에 미세입도의 미분물량은 분쇄가 계속되는 동안에 그림 11.처럼 계속 증가할 것이다.

그림 11. 시간에 따른 단일입도 분쇄물의 질량분율

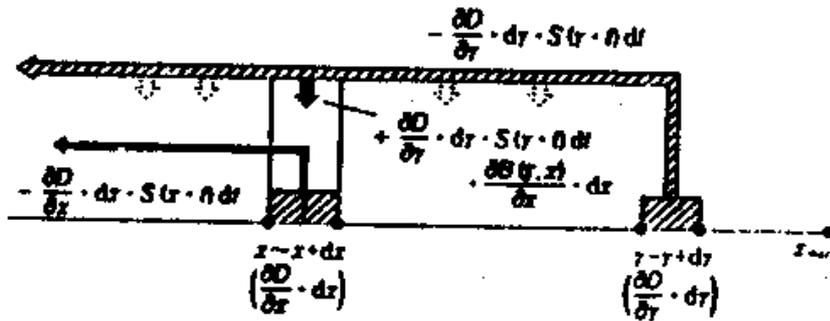


그림 12. 분쇄동력학의 mass · size · balance

입자가 분쇄기 내에서 확률적, 선택적으로 분쇄될 때의 mass-balance를 그림 12.에 나타냈다.  $t$ 를 시간으로 하고, 체하를  $D(x,t)$ 로 나타낸다. 단위질량의 쇠료가 회분 분쇄될 때 입경  $x$ 의 입자군의 질량의  $dt$  시간 내의 변화량은, 분쇄에 의해 감소하는 질량과,  $x$ 보다 큰 모든 단립자  $r$ 가 분쇄되어  $B(r,x)$ 의 분포를 가지고 그 안에서 주목하는  $x$ 의 크기가 되는 입자군의 총량과의 대수합과 같기 때문에 다음 식이 성립된다(응집은 고려치 않음).

$$\frac{\partial^2 D(x,t)}{\partial t \partial x} = -\frac{\partial D(x,t)}{\partial x} S(x,t) + \int_x^{x_{\max}} \frac{\partial D(y,t)}{\partial y} S(y,t) \frac{\partial B(y,x)}{\partial x} dy \quad (1-31)$$

여기에서  $S(x,t)$ 는 입경  $x$ 의 입자의 분쇄확률밀도로서 선택함수 (Selection function)라고 하고,  $B(y,x)$ 는 16에서 서술했던 파쇄함수, 또  $\partial B/\partial x$ 를 분배함수 (Distribution function)라고 한다. 진자식의 파쇄 실험 등에서도 확인되지만,  $B(y,x) = (x/y)^m$ 라고 두는 것이 가능하고, 또 몇 가지의 실험의 결과,

$$S(x,t) = Kx^n \quad (1-32)$$

라고 가정할 수 있다.  $m, n$ 은 정수로 한다.  $K(1/\text{sec} \cdot \mu\text{m}^n)$ 를 분쇄속도정수 (Rate constant)라고 부른다. 이들의 관계를 식(16)에 대입하여 적분하면,  $m=n$ 의 경우

$$R(x,t) = R(x,0)\exp(-Kx^n t) \quad (1-33)$$

$R(x,t)$ 은 체상이다. 또  $m \neq n$ 에서는 근사적으로 다음의 식과 같이 나타내어진다.

$$R(x,t) \approx R(x,0)\exp[-(\mu Kx^n t)^{1/\mu}] \quad (1-34)$$

초기조건  $R(x,0)$ 은 분쇄시간이 길어지면 1로 간주된다. 즉

$$R(x,t) = R(x,0)\exp(-Kx^n t) \quad (1-35)$$

이 관계는 Chujo(1949)가 Ball mill의 상세한 실험에 의해 발견한 식과 완전히 일치한다. 따라서 분쇄성능의 양부는 속도정수  $K$ 에 의해서 직접 비교가 가능하게 되고, mill 내의 입도 분포의 추적, mill의 설계, 동특성 해석 등도 가능하게 되었다.  $K$ 의 값에 대해서는 각종의 mill에 대한 데이터의 집적이 요망되나 충격분쇄가 지배적으로 되는 Ball mill의 모델에 의한 속도 정수의 이론치의 일례는 다음 식으로 주어진다.

$$K = 0.157 \times 10^{-3} (d \cdot \rho / k\Delta t)^{3/2} \cdot D_o^{1/4} \quad (1-36)$$

- $K$  : 단위는  $(1/\text{hr} \cdot \mu\text{m})$
- $d$  : 매체경
- $\rho$  : 매체밀도
- $D_o$  : mill경
- $k = \sigma/x^{-b}$  : 강도정수,  $b$ 는 정수
- $\Delta t$  : 충돌시간(0.01초)

이 식에 의한 계산치는 앞에서 말한 Chujo의 실험치에 거의 일치할 뿐만 아니라, 시멘트용 Tube mill에도 적용 가능하다. 다시 조작조건을 고정해, 물성만을 바꾼  $K$ 의 값은 Bond의 일지수  $W_i$ 와 좋은 대응을 나타낸다. 그림 13은 선택함수  $S$ 와 Ball mill의 매체충전을  $J$ , 분체의 체적률  $f_c$  등의 실험적 관계이다.

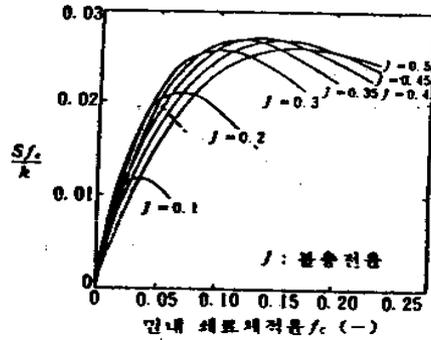


그림 13. 선택함수 S와 Hold-up율(Ball mill), k는 정수

## 7. 세포분쇄(cell-lysis)

세포파쇄 방법에는 물리적인 방법과 비물리적인 방법으로 나눌 수 있다. 물리적인 방법으로 blender에 갈거나 agitation, sonication 등을 들 수 있고, 비물리적인 방법으로는 freezing-thawing, osmotic shock, enzyme treatment, detergent 처리 등을 들 수 있다. 각 처리방법들은 각기 다른 원리로 장단점을 지니고 있다. 먼저, freezing-thawing의 경우 여러 번 반복할 경우 세포 내에 형성된 얼음이 membrane leakage를 유발하게 되어 periplasmic, intracellular protein이나 감염 중인 virus particle 등이 유출되게 된다. Cell type, age, final freeze temperature, heating 과 cooling속도가 중요하게 작용을 하며, 장점으로서는 간단하고 closed system에서 실험이 진행될 수 있으므로 병원성균 실험에 유리하다. 단점으로서는 효과가 크지 않아 세포벽을 지니고 있거나 freezing을 막는 intracellular solute를 지니고 있는 경우에는 부적합하다는 것이 있다. Sonication방법의 경우에는 20kHz 이상의 파장(frequency)을 쏘여줄 경우 gaseous cavitation이 형성되고 형성된 gas bubble이 깨지면서 shock가 일어나 세포가 파쇄되는 원리를 가지고 있다. 이 방법은 세포의 농도에 무관하며 power input 나 exposure time에 영향을 받는다. 주의 사항으로서 contact time이 증가할수록 heat, free radical, ion 등이 생성되어 단백질을 변성시킬 수 있으므로 반드시 얼음에 고정시킨 상태에서 실험을 하여야 한다. Enzyme treatment의 방법인 lysis buffer를 이용 시에는 detergent가 세포막으로부터 protein이나 lipoprotein을 분리시켜 세포내 물질이 유출되게 한다. 주로 bile salt나 sodium laurylsulphate, sodium dodecylsulphate, Triton등이 쓰이며, pH와 temperature에 민감하게 작용한다. 그러나 거품, 단백질의 변성, 침전물이 일어나 일반적으로 사용되지 못하는 단점이 있다.

위에서 열거한 방법들은 cell에서 생산되는 재조합 단백질을 회수하려고 할 때 많이 쓰이는 방법들이다. 이 중 sonication에 의한 cell의 disruption은 virus vaccine을 separation하고자 할 때 주로 쓰이는 것으로 알려져 있다. 그리고 sonication시 buffer volume 또는 power input, exposure time이 얼마냐에 따라 virus가 deactivation되는 시간이 달라지게 된다. 일반적으로 virus가 해를 입지 않으면서 cell을 분쇄할 수 있는 조건을 찾아내는 것이 중요시되고 있다.

## 8. 폐회로 분쇄의 설계 (Design of closed-circuit grinding system)

mill 내를 단 한번 통과와 분쇄에서는 앞의 내용과 같이 쇄제물의 입도분포는 하나로 결정된다. 거기서, 일단 분급하여, 조분 T를 mill에 되돌려 세분 P를 제품으로서 회수한다. 이 system의 특징은 (1)입도분포가 바뀔 수 있다. (2)과분쇄를 피할 수 있다. (3)분쇄능력이 증가한다. 등으로, 다시 회로에 여러 가지 연구가 있다.

식 (1-37)~(1-39)에서 mill 내의 체류량 W와 통과량 F(1+C)을 이용해 체류시간에 치환하고, 다시 clean cut의 조건을 쓴 즉, 다음의 세 개의 관계식을 얻는다.

$$R_p(x/x_c^*) = (1 + Cl) \exp[-(x/x_c^*)^n / (1 + Cl)] - Cl \quad (1-37)$$

$$(x_c/x_c^*)^n = (1 + Cl) \ln[1 + (1/Cl)] \quad (1-38)$$

$$x_c^{*n} = F/KW \quad (1-39)$$

단,  $x_c^*$ 는  $Cl \rightarrow \infty$ 에 대응하는 분급특성입도,  $K$ 는 분쇄속도정수이다.

## 9. 분쇄 기구

각종 분쇄공업에 있어서 분쇄조작으로 다루는 고체의 크기는 m급의 덩어리로부터 nm급의 초미소 입자까지  $10^9$ 의 폭이 있다. m, cm, mm까지는  $10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ 의 변화이지만, mm부터  $\mu\text{m}$ ,  $\mu\text{m}$ 부터 nm까지는 각각  $10^{-3}$ 의 변화이다. 요즘은 각종 분쇄공업의 fine화에 따라서 넓은 입자경의 영역에서 수많은 분쇄기가 개발되고 있다. 한편, 분쇄조작에 투입되는 에너지는 전세계에서 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 塊, 粒, 粉 그리고 폭 넓은 크기의 고체를 취급하는 분쇄조작에서는 다양한 프로세스, 분쇄기가 사용되고 있다. 분쇄기는 취급되는 재료의 크기에 따라 분류하는 것이 일반적이지만 엄밀히 말하면, 쇄료의 크기가 정의되어 있는 것은 아니다. 또 많은 분쇄기 제조업자가 다양한 분쇄기를 개발하여 널리 사용되고 있는 것이 현상이다.

고체를 분쇄하는 원리는 대개 4가지로 분류된다. 즉 힘의 종류에는 인장, 굽힘, 압축, 문지름, 충격, 전단 등 여러 가지의 것들이 고려되는데, 가장 일반적인 힘은 압축, 충격, 마모, 절단이 그것이다. 압축의 원리는 딱딱한 고체를 조분쇄하는 데 쓰이고 충격은 조분쇄나 미분쇄에 함께 쓰이며, 마모의 원리는 연하고 마모성이 적은 물질을 미분말로 분쇄하는 데 쓰인다. 절단의 원리는 일정한 크기나 모양의 입자를 생산하는 데 쓰인다. 그러나 대개의 경우 이 네가지가 모두 작용된다. 그림 14.는 분쇄의 원리를 나타낸 그림이다.

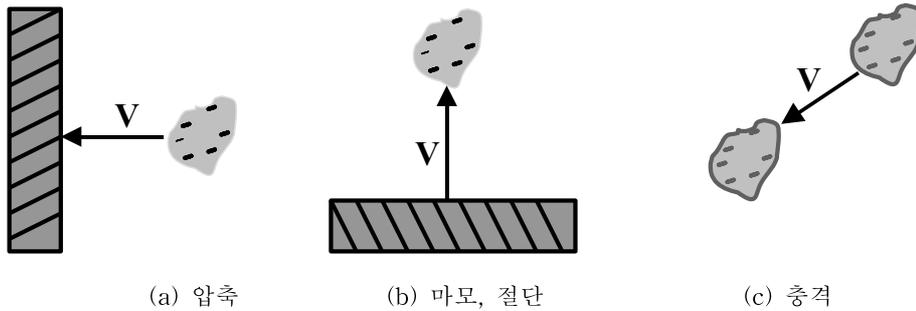
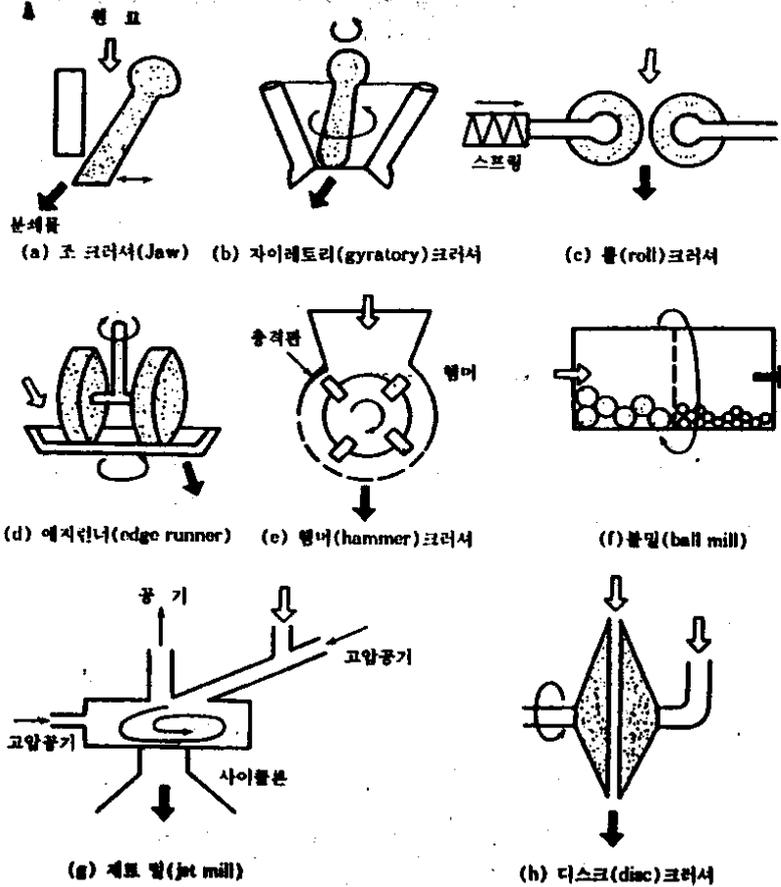


그림 14. 분쇄의 원리

분쇄물의 입경과 형상은 분쇄물의 종류와 분쇄기의 분쇄작용의 양쪽에 의존한다. 즉, 같은 분쇄물이라도 작용하는 힘에 따라서 입자의 크기, 형상, 분포 등의 특성이 달라지게 되기 때문이다. 전단력이 작용하는 분쇄는 가장 미세화 되고, 또한 입경분포 폭도 좁다. 이에 대해 압축력만으로는 미세화가 달성되기 어렵고 입경분포의 폭도 넓다. 충격력은 이러한 중간적 특성을 나타낸다. 이렇게 전단력은 입자를 미세화하기 때문에 가장 미세화하는 데는 효과적인데, 미끄럼 변형에 의한 격자 스트레인의 발생이 현저하고, 입자 자체의 물리화학적 변화가 일어나기 쉽다.

대표적인 분쇄기를 모델적으로 나타낸 것이 그림 15.이다. 먼저, 압축력은 劈開性이 있는 광물 원료의 분쇄에 이용되는데 조크러셔(Jaw crusher)나 자이레토리크러셔(gyratory crusher)등이 그 대표적인 것이다.

롤밀(roll mill)과 에지런너(edge runner) 등도 이에 상당하는데, 이러한 것은 혼합기로서도 사용되고,



점토나 페라이트의 미분쇄나 혼합에 넓게 이용되고 있다. 충격력을 이용하는 기종으로서는 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 분쇄 원료가 효율적으로 분쇄될 수 있도록 설계되고 있다 그림 15.의 분쇄기의 분쇄기는 표(1-5)와 같이

표시될 수 있다. 이 표에서 (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, 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 $\mu$ m정도의 침상결정을 얻을 수 있다.

그림 15. 대표적인 분쇄기

표(1-5). 분쇄기의 분쇄기구

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			○	○	

시멘트 공장에서 다수 사용되고 있는 튜브밀 (tube mill)은 볼밀의 원통이 긴 것인데 밀 내의 볼은 입구에서 출구로 갈에 따라서 직경이 순차적으로 작아지도록 배열되어 있다. 그러나 큰 볼이 출구로 치우치지 않도록 그림 15.(f)에 나타낸 바와 같이 밀내에 칸막이를 설치하는 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 그림 16.(c)와 같이 조합시킨 연속분쇄를 실시한다. 이것을 폐회로 분쇄(closed-loop)라고 한다.

최근, 시멘트공장에서는 튜브밀보다도 분쇄 효율이 높은 구쇄밀(Loshe mill)의 사용으로 이행되는 경향이다. 이것은 그림 17.에 나타낸 중형의 롤밀로 그 기구는 예지런너와 분급기를 하나의 용기에 넣는 형식으로 하부의 회전테이블과 그 위를 회전하는 롤러 사이에 원료가 물려 들어가 압축 미분쇄된다.

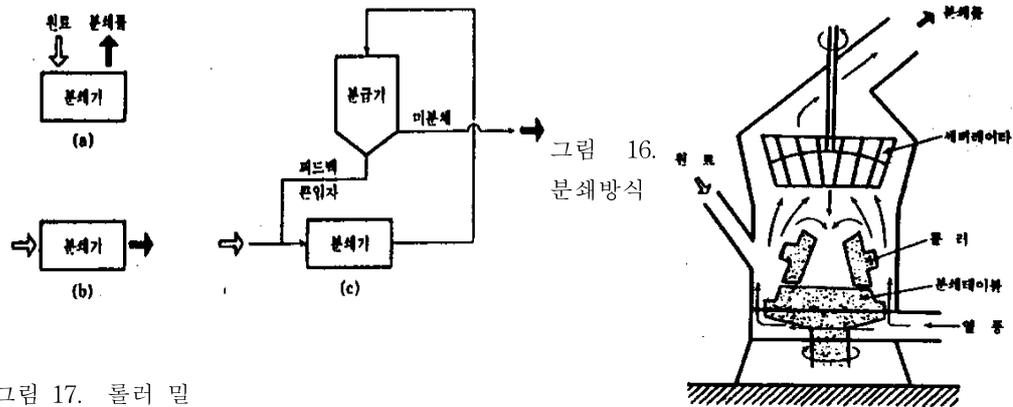


그림 16. 분쇄방식

그림 17. 롤러 밀

미분쇄 물은 열풍으로 상부로 불어 올려져 세퍼레이터(separator)로 분급되고 미분쇄물은 원래의 테이블에 낙하하는 구조이다. 시멘트공업과 같은 대량처리의 경우는 그림 16(b),(c)와 같은 연속식 분쇄가 취해지는데 전자재료와 같은 소량처리와 온도 유지를 위해서는 回分式이 취해지는 경우가 많다. 이 경우 일정량의 원료를 분쇄기에 넣어, 소요입도에 달할 때까지 분쇄한다. 원료와 분쇄물의 취급에는 불편하지만 확실한 분쇄가 이루어지기 때문에 초미분쇄에는 잘 이용되는 방법이다. 각각의 분쇄기에 대해 알아보면 다음과 같다.

## 1] 조쇄기

조분쇄기는 많은 양의 고체를 곱게 축소시키는 속도가 느린 기계이다. 대강의 기준으로써 m급의 피(덩어리)를 10cm 이하로 파쇄한다. 주요한 것으로 Jaw crusher 와 Gyratory crusher가 있다.

### (1) Jaw crusher

가장 흔히 사용되는 Jaw crusher의 유형은 블레이크형 분쇄기이다. 이 기계는 편심기가 두 개의 토글에 연결된 피트맨을 움직이는데, 물건을 씹어 깨뜨리는 동작을 기계화한 것으로, 상대하는 고정치판과 가동치판의 사이에 재료를 씹어 넣어 압축 분쇄한다. 구조는 그림 18.에 나타난 것처럼 한 쌍의 치판의 한쪽은 프레임에 고정하고, 다른 한쪽은 상부를 지점으로써 매어 달려져 어떤 각도를 가지고 상대하고 있다. 파쇄와 파성물의 배출은 가동치의 왕복운동에 의해 행해진다. 양쪽의 Jaw가 이루는 V형 개구의 바닥이 가장 많이 움직이므로 이종류의 분쇄기는 막히는 일이 거의 없다.

### (2) Gyratory crusher

쇄료의 파쇄와 쇄성물의 배출이 연속적으로 행해지는 것이 특징이다. 구조는 그림 19.에 나타난 것처럼 역 원추형의 쇄광발인 콘케이브 속을 크랏싱헤드가 편심선회운동을 하고, 상부로부터 공급된 쇄료를 파쇄해 하부에서 배출한다.

표(1-6). 분쇄기구의 분류

대분류	중분류	분쇄기구	
파쇄기 (crusher)	· 조쇄기 (coarse crusher) · 미쇄기 (fine crusher)	· 조 크러셔(jaw crusher) · 선동파쇄기(gyratory crusher) · 롤파쇄기(crushing roll)	
분말기	· 중간분쇄기	· 해머밀(hammer mill)	
		· 롤링 압축 밀 (rolling compression mill)	· 보울밀(bowl mill) · 롤러밀(roller mill)
	· 미분말기 (fine grinder)	· 마모밀(attrition mill)	
		· 텀블링밀(tumbling mill)	· 로드밀(rod mill) · 볼밀(ball mill) · 페블밀(pebble mill) · 튜브밀(tube mill) · 간막이 튜브밀(compartment mill)
초미분말기 (ultrafine grinder)		· 내부선별기 부착해머밀(hammer mill with internal classification) · 유체에너지밀(fluid-energy mill) · 교반식 밀(agitated mill)	
절단기(cutting machining)		· 나이프식 절단기 (knife cutter) · 입방체절단기(dicer) · 슬릿절단기(slitter)	

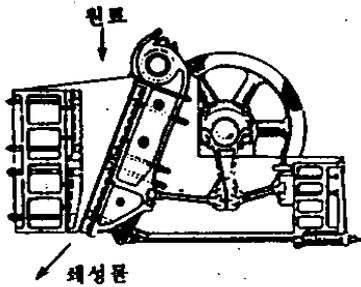


그림 18. Jaw crusher

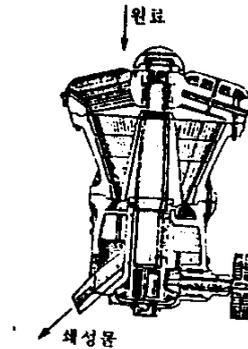


그림 19. Gyratory

## 2] 중쇄기

대강의 기준으로써 입자경 10cm의 쇄료를 1cm 이하로 분쇄한다. 조쇄기를 통해 온 쇄료를 2차 파쇄하는 것도 있다. 주요한 것으로는 Crushing roll, Hammer mill, Roller mill, Gyratory crusher이다.

### (1) Crushing roll

그림 20.에 나타난 것처럼 안쪽으로 향해서 회전하는 2개의 roll 사이에 쇠료입자를 씹어 넣어 압축 파쇄한다. 파쇄확률이 높다. 또 그림 21.에 나타난 고압축 roll mill도 같은 분쇄기구이지만 Crushing roll에 비해 5~10배의 압축력이 작용하도록 고안되어 미분쇄기로써도 사용되고 있다.

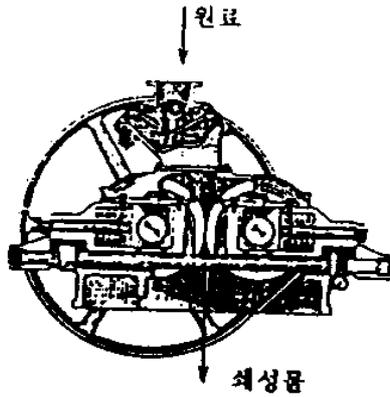


그림 20. Crushing roll

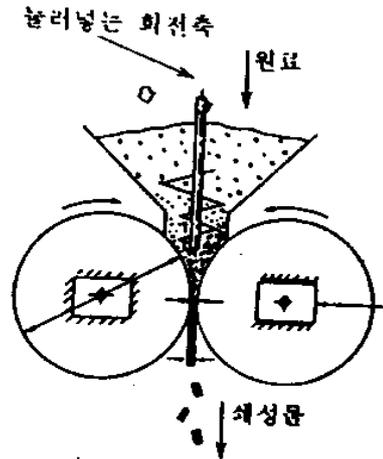


그림 21. 고압 Roller mill

## (2) Hammer mill

구조를 그림 22.에 나타냈다. 고속 회전하는 수평축에 장치된 Hammer로 쇠료를 충격, 전단파쇄, cutting해서 하부의 grate로부터 배출한다. Hammer mill은 직경이 6~18"인 회전원판에 4~8의 망치가 달려있다. 해머는 끝은 금속막대이며, 끝이 평평하거나 뿔뿔한 것도 있고 모서리가 예리하고 날카로운 것도 있다. 산업폐기물 등의 파쇄에 사용되고 있는 schroder도 똑같은 구조이다. Hammer mill의 소요동력은 원료의 성질에 따라 크게 다르며 이론적으로 정확하게 구할 수는

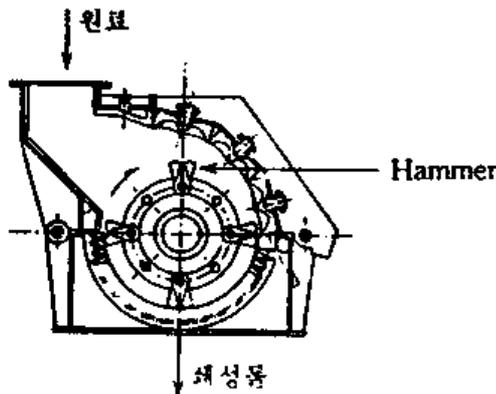


그림 22. Hammer mill

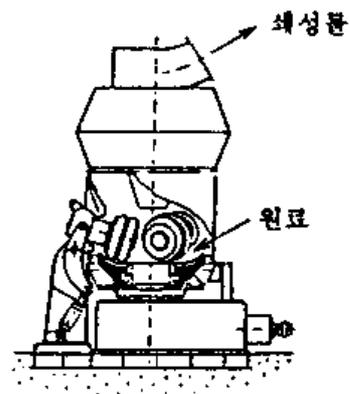


그림 23. Roller mill

없다. 공업적으로 사용되는 밀의 분쇄동력은 100~400lb/hr를 분쇄하는데 1HP-hr이 소요된다.

## (3) Roller mill

수직인 파쇄면과 회전하는 진자식 roller 사이에 공급된 쇠료를 roller에 작용하는 원심력으로 압축분쇄하는 방법과 회전 table 위에 공급된 쇠료를 가압하면서 회전하는 roller로 압축, 전단 분쇄하는 방법이 있다. 후자를 그림 23.에 나타내었다.

### 3] 미분쇄기

이 영역에 속하는 분쇄기는 매우 다양하고, 또 공급 입자경, 쇠성물의 입자경에도 폭이 있어 분류하기 어려운 분쇄기지만 대강의 기준으로서 입자경 1cm의 쇠료를 10 $\mu$ m 이하로 분쇄한다. 주요한 것으로 Roller mill, Jet mill, Ball mill, 진동 mill, 유성 mill 등이 있다.

#### (1) Jet mill

그림 24.에 나타낸 것처럼 유체가 가지는 운동에너지를 이용해서 고압노즐로부터 분출하는 압축공기 혹은 수증기로 생기는 제트기류 속에 쇠료를 공급하여 입자상호의 충돌 혹은 벽면과의 충돌에 의해 분쇄가 진행된다. 분쇄시의 온도상승이 적은 것이 특징이다.

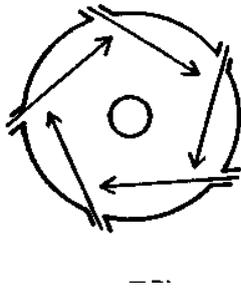


그림 24. Jet mill

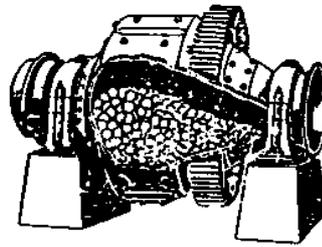


그림 25. Conical ball mill

#### (2) Ball mill

회전원통용기 내에 쇠료와 분쇄매체인 ball을 넣어 분쇄를 행하는 분쇄기로, 긴 역사와 실적이 있고, 신뢰성이 높고 구조가 간단하다. 그림 25.에는 Ball mill의 일종인 Conical ball mill을 나타내었다. 이 특징은 크고 작은 Ball을 장입해서 회전하는 것에 의해 큰 Ball은 공급구측에 작은 Ball은 배출측에 분포하고 합리적인 분쇄가 행해질 수 있는 것에 있다. 최적회전수  $N(r. p. m)$ 은 일반적으로 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$N=32/\sqrt{D} \quad (1-40)$$

여기서  $D(m)$ 는 mill의 내경이다.

#### (3) 진동 mill (Vibration mill)

광의적으로는 Ball mill에 속한다. 분쇄매체를 장입한 원통을 진동시켜 분쇄를 행한다. 그림 26.에 나타낸 것처럼 원통 내에 장입하는 ball의 충전율은 Ball mill의 약 40~50%에 대해 약 80%나 많이 되는 것이 커다란 차이이다. 또 중력가속도에 대해 수배이상의 가속도를 생기게 할 수 있기 때문에 분쇄속도가 빠르게 된다.

#### (4) 유성 mill(Planetary mill)

그림 27.에 나타낸 것처럼 자전하는 원통을 공전시키는 것에 의해 발생하는 수십 배 이상의 원심효과로 Ball을 운동시켜 분쇄를 행하기 때문에 분쇄속도가 보다 빨라진다.

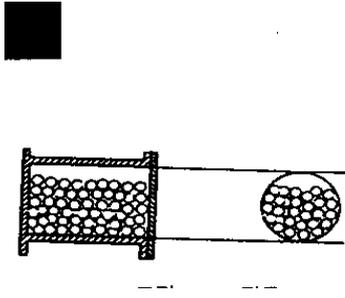


그림 26. 진동 mill

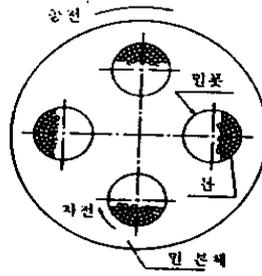


그림 27. 유성 mill

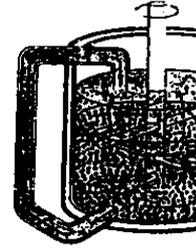


그림 28. 매체교반형 mill

#### 4] 초미분쇄기

대강의 기준으로서 입자경  $10\mu\text{m}$ 의 쇠료를  $1\mu\text{m}$  이하로 분쇄한다. 주요한 것으로서 매체교반형분쇄기가 있다. 미분쇄기로서 소개한 유성 mill, 진동 mill도 분쇄조건에 따라 이 범주에 넣을 수도 있다. 매체 교반형 초미분쇄기는 개발된 후부터 약 60년의 역사가 있다. 그림 28.에 나타난 것처럼 분쇄매체와 쇠료입자를 혼합, 교반함에 따라 충돌, 전단, 압축, 마쇄의 복합작용에 따라 분쇄를 행한다. 분쇄매체의 교반방법의 차이에 따라 많은 분쇄기가 개발, 사용되고 있다.

분쇄는 단순히 고체의 파괴이기 때문에 많은 분쇄기가 개발되어 사용되고 있다. 특히 취급되는 입자경이 작아지는 미분쇄, 초미분쇄기에 그 경향이 두드러진다. 쇠료 입자경이 작아지면 입자경의 3제곱에 역비례하여 입자수가 증가하기 때문에 미분쇄, 초미분쇄기로 됨에 따라 단위시간 내에 많은 쇠료입자에 에너지를 가해 줄 궁리가 이루어지고 있다.

### 10. 예제풀이

[예제 1] 원료의 80%가 3" 체구멍을 통과하고 제품의 80%가 1.5" 체구멍을 통과한다면 석회석 250ton/hr를 분쇄하는데 필요한 동력을 구하라.

풀이)  $\dot{m} = 250 \text{ tons/h}$ ,  $D_{pa}=3 \times 25.4=76.2\text{mm}$ ,  $D_{pb}=1.5 \times 25.4=38.1\text{mm}$

$$\therefore P = 250 \times 0.3162 \times 12.74 \left( \frac{1}{\sqrt{38.1}} - \frac{1}{\sqrt{76.2}} \right) = 47.79 \text{ kW}$$

[예제 2] 시료의 크기가 -10/+20Mesh인 모래 1000g을 Ball Mill에서 5시간 분쇄한 후 200Mesh Sieve를 통과한 제품의 양이 140.7g이었다. Braine법에 의하여 분쇄시료와 분쇄물의 비표면적을 측정된 결과 각각 19, 2720 $\text{cm}^2/\text{g}$ 이었다. 평균분쇄속도를 계산하라.

풀이) 평균분쇄속도식으로부터 구한다.

$$R_{c,av} = Q \cdot \Delta S$$

$$Q = \frac{1000}{5} \text{ g/hr} = 200 \text{ g/hr}$$

$$S_1 = 19 \text{ cm}^2/\text{g}$$

$$S_2 = 2720 \text{ cm}^2 / g$$

$$\therefore R_{c,av} = (200)(2720 - 19) = 5.4 \times 10^5 \text{ cm}^2 / \text{hr}$$

[예제 3] 평균분쇄속도가 4000cm<sup>2</sup>/hr일 때 Ball Mill분쇄에 있어서 소요된 Motor의 에너지가 0.8Kw이라면 분쇄효율은 얼마인가?

풀이) 분쇄효율,  $E_c = \frac{R_{c,av}}{P} = \frac{4,000}{0.8} = 5000 \text{ cm}^2 / \text{KwH}$

[예제 4] 분쇄시료를 채취하여 입경분포를 측정한 결과 다음과 같다.(Shape factor가 일정)

입자 직경, $d_i$ , mm	0.18	0.6	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6
질량분율, $y_i$ , %	3.0	10.0	17.0	24.0	25.0	15.5	6.5

산술평균입자경, 표면적평균입자경, 체적평균입자경, 비표면적평균입자경을 계산하라.

풀이)

$d_i$ , mm	$d_i^2$	$d_i^3$	$y_i/d_i$	$y_i/d_i^2$	$y_i/d_i^3$
0.18	0.0324	0.00583	16.67	92.59	514.6
0.6	0.36	0.216	16.70	27.78	46.30
1.0	1.00	1.00	17.00	17.00	17.00
1.4	1.96	2.74	17.14	12.24	8.76
1.8	3.24	5.83	13.89	7.72	4.29
2.2	4.84	10.65	7.05	3.20	1.45
2.6	6.76	17.58	2.50	0.96	0.37
$\Sigma$	-	-	90.90	161.50	593.00

· 산술평균입자경 :  $d_a = \frac{\Sigma y_i / d_i}{\Sigma y_i / d_i^3} = \frac{161.3}{593} = 0.272 \text{ mm}$

· 표면적평균입자경 :  $d_{as} = \left[ \frac{\Sigma y_i / d_i}{\Sigma y_i / d_i^3} \right]^{1/2} = \left[ \frac{90.9}{593} \right]^{1/2} = 0.391 \text{ mm}$

· 체적평균입자경 :  $d_{av} = \left[ \frac{\Sigma y_i}{\Sigma y_i / d_i^3} \right]^{1/3} = \left[ \frac{100}{593} \right]^{1/3} = 0.552 \text{ mm}$

· 비표면적평균입자경 :  $d_{vs} = \frac{(d_{av})^3}{(d_{as})^2} = \frac{(0.552)^3}{(0.391)^2} = 1.09 \text{ mm}$

[예제 5] 위 문제의 입경분포에서 형상계수  $\psi$ 가 6.5, 분체의 밀도  $\rho_p$ 가 1.79g/cm<sup>3</sup>일 때 비표면적을 계산하라.

풀이)

$$S_w = \frac{\psi}{\rho_p d_{vs}} = \frac{(6.5)(0.391 \times 10^{-1})^2}{(1.79)(0.552 \times 10^{-1})^3} = 33.0 \text{ cm}^2 / g$$

[예제 6] 쇠료의 평균입자경이 10mm, 쇠성물의 평균입자경이 2.5mm이다. 분쇄처리량이 10ton/hr일 때 분쇄기의 소요동력이 40Hp이다. 이 분쇄기의 공운전의 소요동력은 20Hp이다.

처리량을 변화시키지 않고 분쇄제품의 평균직경을 0.8mm로 할 경우 소요마력수를 계산하여라.

풀이)

$$E_1 = K \cdot \frac{\Psi}{\rho_p} \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) = K \cdot \frac{\Psi}{\rho_p} \left( \frac{1}{2.5} - \frac{1}{10} \right) = 40 - 20$$

$$E_2 = K \cdot \frac{\Psi}{\rho_p} \left( \frac{1}{0.8} - \frac{1}{10} \right)$$

두 식에서  $E_2 = 77\text{Hp}$

$\therefore$  소요마력 =  $77+20 = 97\text{Hp}$

[예제 7] 체적평균입자직경이 0.75in인 쇠료 12ton/hr를 0.20"로 분쇄하는데 9.3Hp의 동력이 소요되었다. 이 쇠료 10ton/hr를 0.15in로 분쇄하는데 소요되는 동력을 계산하여라.

풀이) Rittinger법칙에서

$$E = K \cdot \frac{\Psi}{\rho_p} \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right)$$

$$\frac{9.3}{12} = K \cdot \frac{\Psi}{\rho_p} \left( \frac{1}{0.20} - \frac{1}{0.75} \right), \quad \frac{E}{10} = K \cdot \frac{\Psi}{\rho_p} \left( \frac{1}{0.15} - \frac{1}{0.75} \right)$$

두 식에서  $\therefore E = 11.4\text{Hp}$

[예제 8] 분쇄제품의 비표면적평균입자직경이 0.50mm이고 비중이 2.3g/cm<sup>3</sup>인 분쇄체의 비표면적을 계산하여라. 형상계수  $\Psi = 13$ 이다.

$$\text{풀이) } S_w = \frac{\Psi}{\rho_p} \cdot \frac{1}{d_{vs}} = \left( \frac{13}{2.3} \right) \left( \frac{1}{0.50} \right) = 11.3 \text{ cm}^3/\text{g}$$

[예제 9] Ball Mill의 회전 효율이 74%일 때 직경 80in Ball Mill의 최적 회전수를 계산하여라. (Ball의 직경의 영향은 무시)

$$\text{풀이) } n_c = 54.2 \sqrt{\frac{1}{R-r}} \doteq \frac{54.2}{\sqrt{R}} = \frac{54.2}{\sqrt{80/12}} = 20.8 \text{ r.p.m}$$

$\therefore$  최적회전수 =  $(20.8)(0.74) = 15.4\text{rpm}$

[예제 10] 어떤 분쇄기에서 평균입자직경이 0.87in인 분쇄시료 15ton/hr를 0.31in로 분쇄하는데 8Hp의 동력이 소요되었다. 공운전시에는 0.50Hp가 소요된다. 같은 능력의 분쇄기로 0.10in크기로 분쇄하는데 필요한 동력을 계산하여라.

$$\text{풀이) } \frac{7.5}{E} = \frac{\left( \frac{1}{0.31} - \frac{1}{0.87} \right)}{\left( \frac{1}{0.10} - \frac{1}{0.87} \right)}$$

$\therefore E = 31.9\text{Hp}$

고로 총 필요한 동력 = 31.9+0.50 = 32.4Hp

[예제 11] Roll Crusher의 운전조건이 다음과 같을 때 분쇄능력을 계산하여라.

- 분체의 밀도,  $\rho_p = 2.7\text{lb/ft}^3$
- Roll의 회전속도,  $N = 120\text{r.p.m}$
- Roll의 직경,  $D = 3\text{ft}$
- Roll 표면의 폭,  $L = 5\text{ft}$
- Roll과 Roll 간의 반간격,  $d = 0.03\text{ft}$

풀이)  $\therefore Q = 13.6 \cdot \rho_p \cdot N \cdot D \cdot L \cdot d$   
 $= (13.6)(2.7)(120)(3)(5)(0.03) = 2,000\text{lb/hr}$

[예제 12] 분쇄기로 평균입자경 1.0"의 쇄료를 0.3"로 분쇄하는데 소요동력이 10Hp이었다. 처리량을 변화시키지 않고 쇄료를 0.1"로 분쇄하는데 필요한 소요동력을 Rittinger, Kicks, Bond의 법칙의 법칙으로부터 구하라. (공운전동력은 0.5Hp)

풀이) \* Rittinger의 법칙

$$E = K \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right)$$

$$10 - 0.5 = K \left( \frac{1}{0.3} - \frac{1}{1.0} \right), \quad E - 0.5 = K \left( \frac{1}{0.1} - \frac{1}{1.0} \right)$$

두 식에서  $\therefore E = 37\text{Hp}$

\* Kicks의 법칙

$$E = K_K \log \frac{d_1}{d_2}$$

$$10 - 0.5 = K_K \log \frac{1.0}{0.3}, \quad E - 0.5 = K_K \log \frac{1.0}{0.1}$$

두 식에서  $\therefore E = 19.7\text{Hp}$

\* Bond의 법칙

$$E = K_B \left( \frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right)$$

$$10 - 0.5 = K_B \left( \frac{1}{\sqrt{0.3}} - \frac{1}{\sqrt{1.0}} \right), \quad E - 0.5 = K_B \left( \frac{1}{\sqrt{0.1}} - \frac{1}{\sqrt{1.0}} \right)$$

두 식에서  $E = 25.2\text{Hp}$

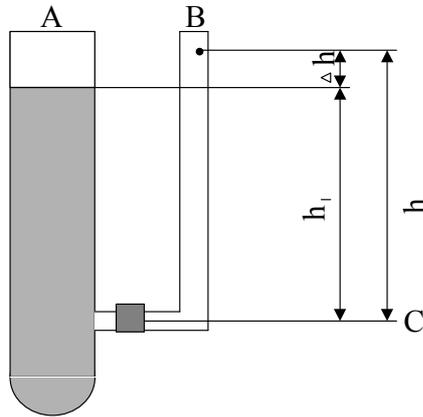
[예제 13] 밀도가 2.1g/cm<sup>3</sup>인 분체를 내경 24mm의 침강분석기로 시험한 결과 다음의 데이터를 얻었다. 이 분체의 입경분포를 구하여라. 시료는 물에 현탁시켰으며 농도는 질량백분율로 5%이다. 시험온도는 20°C이다.

시간 (t, min)	0	1	2	3	4	6	8	12	16	20	24	28	32	40
액면차 ( $\Delta h$ , min)	11.0	9.7	8.4	6.85	5.95	5.10	4.00	2.40	1.40	0.80	0.45	0.25	0.15	0.05

풀이) 침강시험 장치는 그림과 같다.

t = 0일 때

$$\text{현탁액의 밀도, } \rho_{sp} = \frac{100}{95 + \frac{0.5}{2.1}} = 1.026 \text{ g/cm}^3$$



$$\Delta h_t = h - h_1 = h_1 \left( \frac{h}{h_1} - 1 \right) = h_1 \left( \frac{\rho_{sp}}{\rho} - 1 \right) = \frac{h_1}{\rho} (\rho_{sp} - \rho)$$

$$h_1 = \frac{\Delta h \rho}{\rho_{sp} - \rho} = \frac{(11)(1)}{1.026 - 1} = 42.3 \text{ cm}$$

침강 시험 장치

분체침전량,  $M_o = (42.3) \left( \frac{\pi 2.4^2}{4} \right) (1.026)(0.05) = 9.82g$

또  $M_o = K(\rho_{sp} - \rho)$

$$K = \frac{M_o}{\rho_{sp} - \rho} = \frac{9.82}{0.026} = 378cm^3$$

$\Delta h_t = \frac{h_1}{\rho K} \cdot M_t$ 에서

$$M_t = \Delta h_t \cdot \frac{\rho K}{h_1} = \frac{(1)(378)}{(42.3)} \cdot \Delta h_t = 8.93\Delta h_t, gr$$

$$G_t = M_o - M_t = 9.82 - 8.93\Delta h_t, gr$$

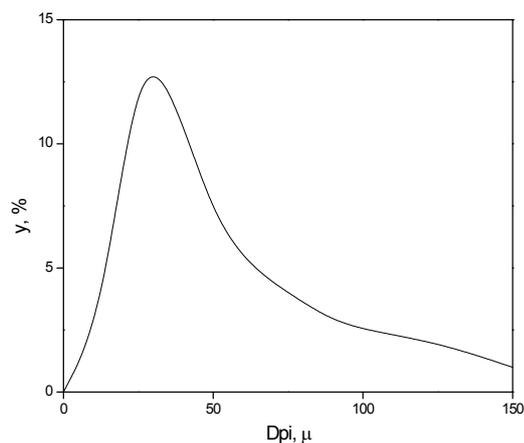
위 식에 시험결과를 넣고 점철하여  $\Delta G_t$ 를 구한 후 질량백분율을 y%로 계산한다.

또한 Stokes법칙에 의하여

$$D_{\pi} = \left[ \frac{18\mu U_i}{(\rho_p - \rho)g} \right]^{1/2} = \left[ \frac{(18)(0.01)U_i}{(1.1)(980)(60)} \times 10^8 \right]^{1/2} = 16.7\sqrt{U_i}, \mu$$

또한  $\mu_i = \frac{2h_1}{t_i + t_{i+1}} = \frac{84.6}{t_i + t_{i+1}}, cm/sec$

따라서 시험 결과에 대한  $D_{\mu}$ 와 y%를 구하여 입경분포를 도시하면 다음 그림과 같다.



입경분포