

Ball mill에서의 최적 ball size 및 그 배열

허 금 정 譯

<쌍용양회생산관리부 과장대리>

[譯者註]

◆.....본 리포트는 *Zement-Kalk-Gips*, 1967-9의 p. 378~384에 실려 있는 J.P.◆
◆.....Bomble의 연구 논문을 번역한 것이다.◆

要 約

ball mill로 최적의 능률을 달성하고 생산의 최대 Blaine을 얻기 위하여 ball을 최적으로 배열 선택하여야 한다.

이 논문에서는 분쇄기 직경과 분쇄도를 고려하여 피분쇄 물질의 입도에 따르는 최적의 ball size 계산법이 전개되었다. 나아가 분쇄물의 Blaine으로부터 입도 계산에 대한 단순한 관계가 명시되었다.

Blaine은 분쇄기의 길이를 직선적으로 증가시키기 때문에 chamber의 길이와 수 그리고 필요한 球의 직경이 graph의 방법으로 쉽게 규정된다. 보다 큰 球의 사용으로 인한 손해는 분쇄기의 원료(피분쇄물)를 사전에 파쇄시킴으로써 제거될 수 있다. 그 발전 경향은 보다 작은 분쇄 매체(grinding media)의 사용으로 진전되었으며 그 이유는 다음과 같다.

- ① 증대된 분쇄기 직경
- ② 피분쇄물의 사전 파쇄
- ③ 분쇄 법칙에 대한 지식 향상

경 ③ 피분쇄 물질의 분쇄도가 그것이다.

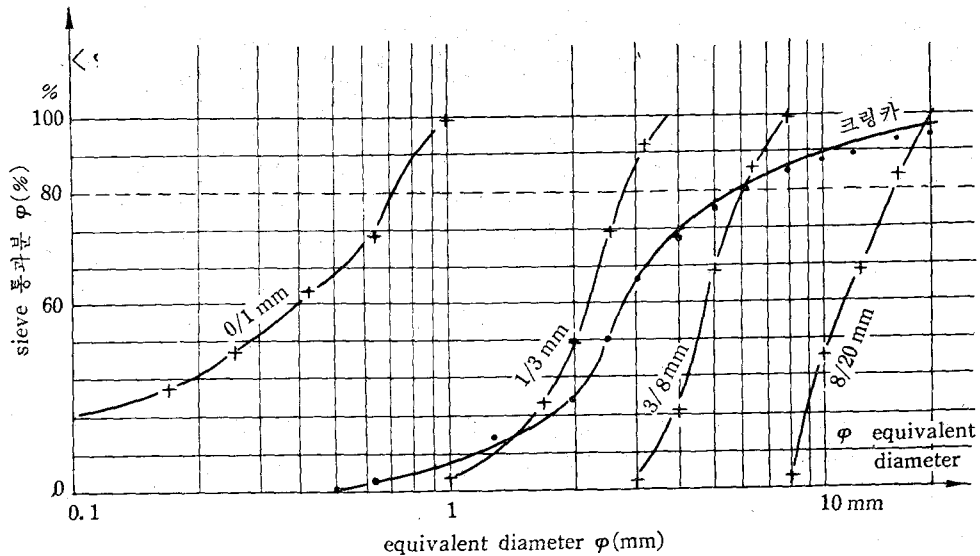
강구의 에너지는 강구의 크기와 충격 속도에 달려 있다. 즉 球의 직경과 분쇄기의 직경에 달려 있다. 피분쇄물의 분쇄를 위해 필요한 에너지는 피분쇄물의 크기와 피분쇄물의 引張力과의 함수이다.

mill은 최적 회전수($n = \frac{32}{\sqrt{D}}$)와 적당량의 강구 charge(내부 크기의 40% 정도)로서 최고의 분쇄 능력에 달하며 피분쇄물에 따른 강구 배열이 적절해야 한다. 피분쇄물의 size는 mill을 통

I. 序 言

古來로 인간은 바위덩이를 깨기 위해서는 무거운 해머를 들어 올려야 하고, 분쇄할 물질이 크고 단단할수록 그만큼 더 높이 들어 올려야 한다는 사실을 알고 있다.

이 말은 이미 분쇄기에 있어서 강구의 선택에 관한 세 가지 중요한 요소를 암시하고 있다. 즉 ① 분쇄 물질의 용적(size) ② 분쇄기(mill)의 직



〈그림-1〉 사용된 크링카의 sieve 분석

과하는 과정에서 연속적으로 미분쇄되므로 이들 微粉들은 계속적으로 제거되어야만 한다.

더우기 生産者들은 오래 전부터 그들의 분쇄기를 여러 개의 室(chamber)로 분배하여 그 속에서 강구의 크기를 다소간 분쇄물에 알맞게 조절해 왔다. 그리고는 chamber와 강구의 크기에 따라 선택되었다. 이것은 크링카 분쇄에 특히 관련되며 다른 분쇄물에도 적용될 수 있는 것이다.

II. 분쇄 물질 size에 대한 최적 강구의 크기

1. 실험

작업의 첫 시도로서 강구 직경은 분쇄물질 size와의 함수로서 $d=f(\phi)$ 로 추정될 수 있고(ϕ : 피분쇄물 size, d : 강구 직경) 그러므로서 규정된 mill과 주어진 피분쇄 물질에 대한 최적의 강구 직경을 계산할 수 있다.

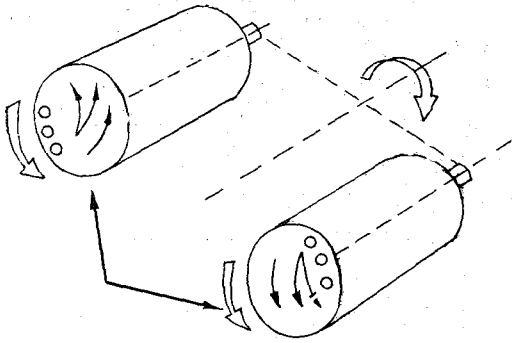
여기에 취해진 4종의 크링카에 대한 분쇄 실험은 forged steel ball로서 행하여졌고 그 steel

ball의 직경은 1.5~60 mm이며 크링카 최고 size는 25 mm였다. 4종의 크링카 size의 구분은 0~1, 1~3, 3~8, 8~20 mm였고 이 구분중 0~1 mm는 큰 크링카 덩이를 사진 분쇄한 것을 나타낸다. 〈그림-1〉은 상기 4종의 sample을 분쇄한 후의 크링카 sieve 분석을 plot한 것을 표시한다.

크링카의 분쇄도는 비표면적에 의해 판단할 수 있는데 Papadakis¹⁾의 방법 "Compression lente"에 의해 규정된 바 $B=49 \text{ cm}^2/\text{Joule}$ 였다. 분쇄시킨 크링카는 아주 단단했고 대부분 크링카의 비표면적은 $60\sim90 \text{ cm}^2/\text{Joule}$ 였다.

이 결과는 大型 mill에도 轉用될 수 있으므로 그 실험을 위해서는 하나의 분쇄기를 사용하여야 하고 그때 강구의 낙하 속도는 거의 공업적인 분쇄 설비에 있어서 만큼 커야 할 것이다. 이러한 요구는 Cerilh 실험실²⁾의 "위성 분쇄기"에 의해 충족되었는데 여기서는 중력 가속도보다 더 큰 원심력이 작용한다. 그 원리는 〈그림-2〉에 나타나 있다.

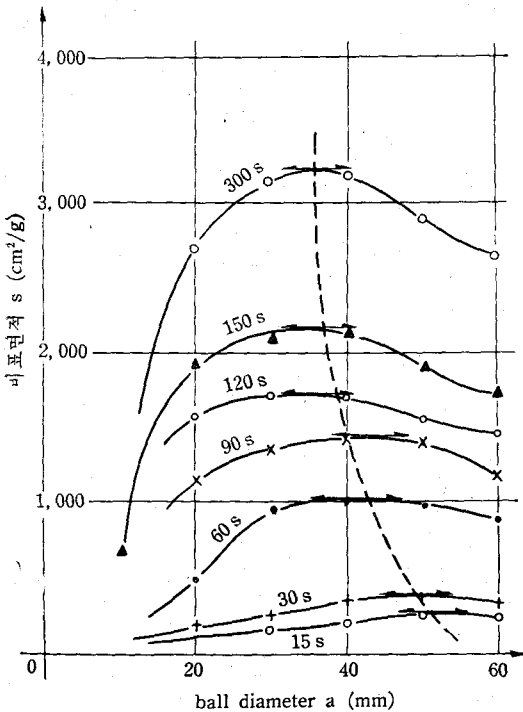
재래의 球粉碎機에 있어서(직경이 D_1 인) 강구가 직경 D_2 인 위성 분쇄기의 경우와 같은 충



<그림-2> 衛星粉碎機(satellite mill)의 동작 원리
 격력을 갖는다면

$$D_1 = \frac{r}{g} D_2 \dots\dots\dots ①$$

가 성립된다(r : 원심력 $\Omega^2 R$, g : 중력 가속도).
 회전시킨 위성 분쇄기의 원심력 r 는 12g, 직경 $D_2=20$ cm이며 따라서 직경 $D_1=240$ cm인 분쇄기의 실험 결과와 동등함을 나타낸다. 따라서 이 분쇄기의 회전수는 $\frac{32}{\sqrt{2.4}}=20.6$ u/min로



<그림-3> 鋼球直徑과 粉碎時間에 따른 비표면적 S의 변화(feeding clinker size 8~20 mm)

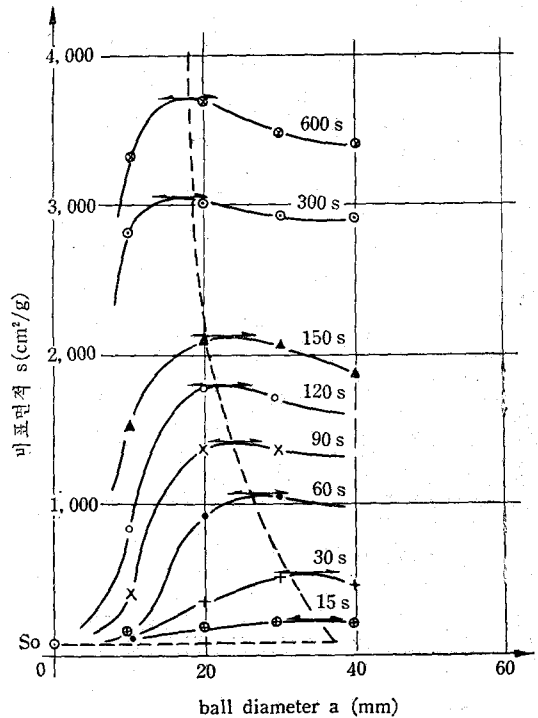
된다.

강구는 분쇄기 1회전 동안 1.25의 비율 즉 회전수에 비례하여 입자를 만나며 위성 분쇄기의 회전수가 393 u/min이므로 그 때리는 빈도는 $393 : 20.6 = 19$ 배 同 종류의 mill의 경우에 있어서만큼 높다. 따라서 실험 분쇄기에 있어서의 분쇄 시간은 아주 짧다(5 mm size의 크링카에서 Blaine 3,500 cm²/g의 시멘트 분말을 생산하려면 4~5分 정도 요한다). 그 실험은 15~600秒 사이에 이루어졌다.

분쇄실에는 각 실험마다 14 kg의 강구와 2.8 kg의 크링카가 채워졌다. sieve 분석에 대한 실험은 분쇄 시간 15, 30, 60, 90, 120, 150, 300, 600秒에 대해 행해졌고 Lea와 Nurse¹⁾의 비표면적이 사용됐다. sieve 분석은 60 μm 이상은 보통의 sieve로 40 μm 이하는 Bacho-Sichter로 가려졌다.

2. 실험 결과

<그림-3, 4, 5, 6>은 각기 구분된 size의 종



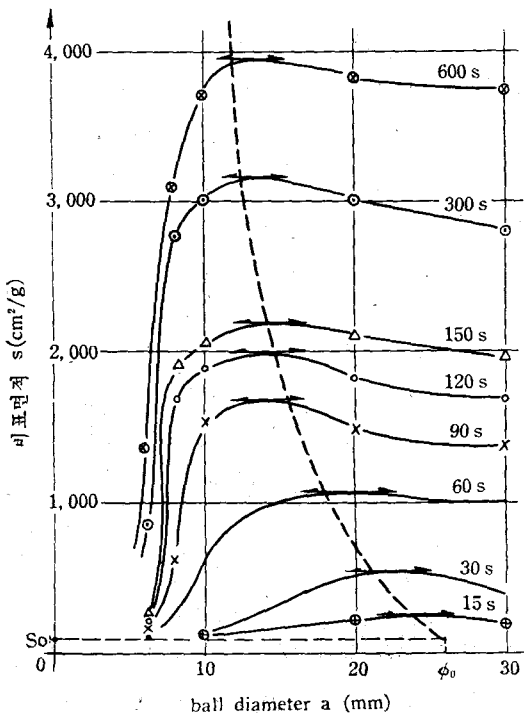
<그림-4> 鋼球直徑과 粉碎時間에 따른 비표면적 S의 변화(feeding clinker size 3~8 mm)

류와 분쇄 시간에 따른 강구 직경에 의한 Blaine 변화를 나타낸다. <그림-3>에서 <그림-6>까지의 모든 변곡점은 최대치를 나타낸다. 즉 각각의 경우에 따른 강구의 크기가 있고 이를 통해서 가능한 Blaine 최대치가 증명된다. 최적의 강구 직경은 분쇄 시간이 길어짐에 따라 떨어진다. 왜냐하면 분쇄 물질이 더 미분되어지기 때문이다.

곡선의 최대치를 연결하고 이것을 S_0 즉 가로 좌표의 절편까지 연장시켜 보면 분쇄 물질 분류에 따른 분쇄 초기에 가장 알맞은 강구 크기를 얻게 된다. 이는 <표-1>에 근사치가 제시되어

<표-1> 상이한 size에 있어서 분쇄 초기의 최적 강구 크기

크링카 size (mm)	강구 크기 (mm)
8 ~ 20	55
3 ~ 8	38
1 ~ 3	26
0 ~ 1	17



<그림-5> 鋼球直徑과 粉碎時間에 따른 비표면적 S의 변화 (feeding clinker size 1~3 mm)

있다.

<그림-7>은 이 수치를 퍼분쇄 물질 size의 함수 $d=f(\phi_{100})$ 로 나타내고 이에 대한 곡선의 방정식을 유도한다.

$$d = a \cdot \phi^n \quad (\text{단 } 0 < n < 1) \quad \text{②}$$

직경 240 cm 인 mill과 분쇄된 크링카에 대한 강구 직경은 다음과 같다.

$$d = 4.25 (\phi_{100})^{0.4} \quad \text{③}$$

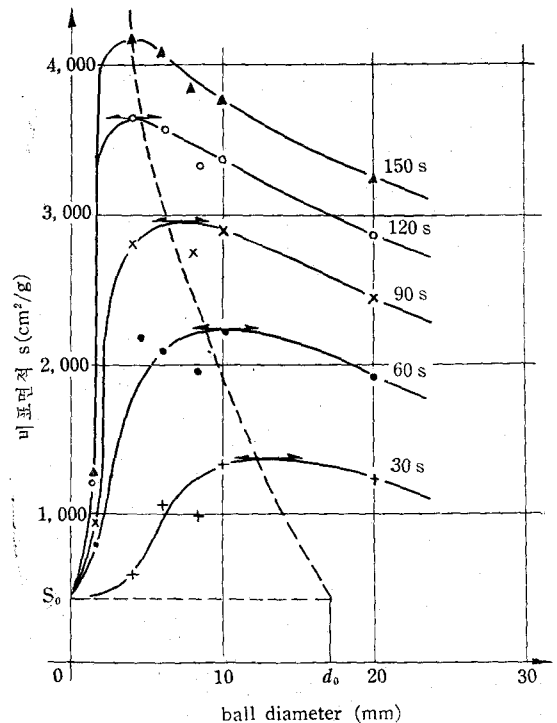
80% 통과분 ϕ_{80} 의 특성을 규정하는 것은 단순하며 이 크기가 보통 maximum size로 자주 선택되므로 <그림-7>에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d = 4.75 (\phi_{80})^{0.4} \quad \text{④}$$

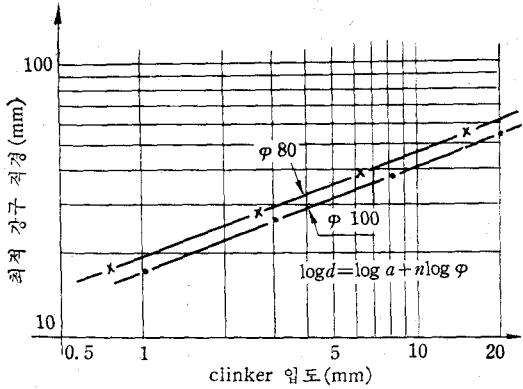
그러므로 sieve 분석으로부터 최대의 분말도에 이르는 최적의 강구 직경을 계산할 수 있다. 그리고 또한 球形(<그림-8>과 같이 압축 분쇄함) 분쇄 이론에 대해서도 상호 연관시킬 수 있다.

$$d = c \cdot \phi^{2/3} \quad \text{⑤}$$

즉 이리하여 ϕ 에 대한 지수 방정식에 이르게 되며 여기서 지수 n 은 실험적으로 발견된 값



<그림-6> 鋼球直徑과 粉碎時間에 따른 비표면적 S의 변화 (feeding clinker size 0~1 mm)



parameter; 100%, 80% sieve 통과분
 $\log d = \log a + n \log \phi$
 <그림-7> clinker feeding size에 따른
 최적 강구 직경

$n=0.4$ 와 일치한다.

이는 다음과 같이 전개될 수 있는데 동일한 기하학적 조건에 의해 분쇄된다는 이론이나 실제에 있어서는 그렇지 않다.

III. 보편화: 분쇄기 직경과 분쇄도의 영향

1. 분쇄기 직경의 영향

어떤 다른 분쇄기 직경이 240cm의 최적 직경으로 계산된다면 환산에서 강구의 낙하 에너지는 일정한 크기로 고정된다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \text{const} \dots\dots\dots ⑥$$

강구의 평균 낙하 속도는 분쇄기 직경 D 에 관계된다. Joisel^{3),4)}에 따르면

$$v = 48\sqrt{D} \text{ (cgs 단위)} \dots\dots\dots ⑦$$

이다.

강구의 무게는

$$m = \frac{7.8 \pi d^3}{6} = 4.1 d^3 \dots\dots\dots ⑧$$

이 수치를 ⑥식에 대입하면

$$d^3 D = K^3 \text{ 이 되고}$$

$$d = \frac{K}{\sqrt[3]{D}} \dots\dots\dots ⑨$$

이다.

$$\left[\begin{array}{l} \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 4.1 d^3 \times 48 D = k \\ d^3 D = \frac{k}{196.8} = K^3 \\ \therefore d = \frac{K}{\sqrt[3]{D}} \end{array} \right]$$

<表-2> 서로 다른 직경의 mill에 있어서
 방정식 ②의 계수 a 값

mill의 직경 D (cm)	방정식 ②의 계수 a (cgs 단위)	비 고
350	3.75	공 장 용
300	3.95	공 장 용
240	4.25	공 장 용
200	4.5	공 장 용
160	4.9	공 장 용
65	6.5	실 험 용

낙하 에너지 또는 Rittinger의 법칙에 의한 새로 규정된 비표면적의 증가는 강구 직경이 분쇄기 직경의 $\frac{1}{3}$ 승에 비례하여 선택될 때 역시 일정 (constant)하다.

이들 방정식으로서 동종의 피분쇄 물질에 사용되는 직경이 다른 분쇄기들을 위한 방정식 ②의 계수 a 가 계산된다(<표-2>). 왜냐하면 그 계수는 직경 240cm의 분쇄기로 알려져 있기 때문이다. 이 계수는 1cm 균일의 크링카 분쇄를 위한 최적 직경이다.

<표-2>는 다음과 같은 것을 나타낸다. 즉 분쇄기 직경은 강구 직경에 아주 조금밖에 영향을 미치지 않으며 분쇄기 직경 10cm 변화에 대해 약 1~2%밖에 안된다. 실험 분쇄기에 있어서는 그 영향이 근본적으로 더 강하다.

2. 피분쇄 물질의 분쇄도가 미치는 영향

<그림-8>에 따른 압축 분쇄에 관련시켜 얻어지는 힘 F 는 다음과 같다.

$$F = K \cdot d^3 = K_2 \cdot \phi^2 T \dots\dots\dots ⑩$$

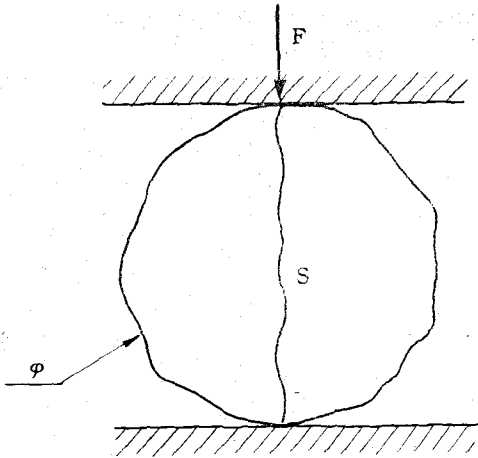
T ; 분쇄물질의 引張力

방정식 ⑩으로부터 모든 유사한 분쇄 조건에 대한 일정한 가정을 고려할 수 있다.

$$d = K_3 \cdot T^{1/3} \dots\dots\dots ⑪$$

강구 직경은 이론적으로 분쇄 물질의 인장력의 $\frac{1}{3}$ 승에 따라 변경된다. 이 인장력을 측정하는 것은 특히 시멘트 공업에 있어서처럼(기하학적 원리에 맞는 크링카의 인장력은 100 kp/cm²) 분쇄 물질이 미분 개재나 분말 형태일 때 대부분 의 경우 어렵다.

비표면 증가 ΔS 를 통해 재료의 분쇄도 B 를 적용하여 일단위 W 에 대한 기호로 표시하는 것은 보다 간단하다.



〈그림-8〉 球形物質의 壓縮粉碎

$$B = \frac{4S}{W} \dots\dots\dots ⑫$$

피분쇄 물질에 대한 파쇄 변형이 동일한 크기로 분쇄될 경우 동일한 T 값을 갖는다면 또한 간단하게 서술할 수 있다.

$$B \approx \frac{K'}{T} \dots\dots\dots ⑬$$

이것을 방정식 ⑪에 대입하면

$$d \approx \frac{K''}{\sqrt[3]{B}} \dots\dots\dots ⑭$$

가 된다. 방정식 ③과 ④의 계수 a 가 크링카 ($B=49 \text{ cm}^2/\text{Joule}$)로 알려져 있으므로 우리는 방정식 ⑭에 대하여 각각 다른 분쇄도에 있어서의 최적 강구 직경 특히 일정(constant) 분쇄기의 직경을 계산할 수 있다. <표-3>의 강구 직경은 1 cm의 피분쇄물에 적용된다.

일단위(Arbeitseinheit)의 표면 증가는 Pappadakis Method 즉 Cerih^{12,53}의 또 다른 이론에서 서술된 방법이나 위성 분쇄기와 같은 실험 분쇄기의 도움으로서도 측정될 수 있다.

방정식 ⑪과 <표-3>은 다음과 같은 사실을 말해 준다. 즉 분쇄도는—분쇄기 직경과 마찬가지로—만약 유사한 분쇄도를 가진 피분쇄 물질에 한정시켜 공급하기만 한다면(약 5%, 즉 $10 \text{ cm}^2/\text{Joule}$ 의 분쇄도 변화) 강구 직경에 극히 적은 영향을 미친다는 것이다.

그러므로 시멘트 공업에 있어서 강구 배열이 slag에 맞춰져 있는 분쇄기는 크링카의 분쇄에 대해서도 좋은 효과를 얻을 수 있으며 크링카는

〈表-3〉 피분쇄도(일단위당 비표면적)에 따른 1 cm 크기 피분쇄물을 위한 강구 직경

	일단위당 비표면적 B_2 (cm^2/Joule)	강구 직경 (mm)
고로 slag	40	4.5
hard burning clinker	50	4.2
middle hard burning clinker	70	3.8
light, 다공성 clinker	70	3.8
ash (회분)	90	3.4
석회석, 석고	150 250	2.9 2.5

보편적으로 보다 훨씬 쉽게 분쇄될 수 있다(그때 분쇄도의 차이는 주어진 slag의 입도를 증가시켜 차이를 없앨 수 있다). 반면 만약 아주 다른 재료를 분쇄하려면(원료, 석탄, 회 등) 강구 배열을 변경시켜야 한다.

3. 방정식 ②의 보편화

방정식 ②, ⑨, ⑭로부터 직경 D 인 분쇄기에 있어서 최적 강구 직경과 분쇄 가능성 B 인 물질을 위해 다음과 같은 보편 타당한 방정식을 유추할 수 있다.

$$d = \frac{b \cdot (\phi_{80})^{0.4}}{\sqrt[3]{B \cdot D}} \text{ (cgs system에서 } b=0.5) \dots\dots\dots ⑮$$

이것을 d 와 ϕ 를 mm, b 를 m, B 를 cm^3/Joule 단위로 환산해서

$$d = \frac{93(\phi_{80})^{0.4}}{\sqrt[3]{B \cdot D}} \dots\dots\dots ⑯$$

로 변형할 수 있다.

실험적으로는 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 즉 ball의 大小量만이 분쇄도에 영향을 주며 그 ball 형태는 영향을 주지 않는다⁶²는 것이다. 球形이 아닌 grinding media 또는 다른 특수한 비중의 grinding media로 바꾼다면 방정식 ⑯으로서 鋼鐵球(steel ball)에 해당하는 직경을 계산해 낼 수 있다.

IV. 球粉碎機에 있어서 ball의 분류

다수의 실험실 실험⁷³으로 매우 흥미있는 현상이 나타났는데 이는 즉 grinding media의 혼합은 피분쇄 물질의 입도에 따라 적용된다는 것이

다. 보다 무거운 강구를 사용함에 있어 가장 큰 손실은 다음과 같은 데 있다. 즉 큰 size의 ball을 많이 사용하면 이미 미분된 물질을 다시 응집함으로써 필요 에너지가 상승하는 것이다. 그 응집은 <그림-3>에서 <그림-6>까지 보듯이 곡선의 하락을 야기시킨다. 보다 더 큰 입도와 자체 응집력이 강한 물질에 있어서는 아주 작은 ball에 대해서도 이 영향은 나타난다.⁸⁾ 보다 큰 ball에서는 그 외에 鋼鐵材의 (shell liner 등) 마모와 변형 (deformation)되어 버리는 조건이 된다.

1. ball mill에 있어서 비표면적의 증가

비표면적의 증가는 몇몇의 시멘트 분쇄기와 원료 분쇄기의 실험을 통해서 입증되었다. 관찰을 통해 나타난 것은 良質의 분쇄기에 있어서 비표면적이 분쇄기 안에서 피분쇄 물질의 진행 거리에 비례하여 커지고 그것은 Rittinger의 법칙과 일치한다는 것이다.

위치 x 에 있어서 비표면적 S 는 다음과 같다.

$$S_x = S_0 + c \cdot x = S_0 + \frac{4S}{L} x \dots\dots\dots(17)$$

x 는 진행 거리이고 L 은 분쇄기의 길이, S_0 는 주어진 미분쇄물의 비표면적 그리고 c 는 분쇄 입

도 · 생산량 · 피분쇄물 및 기계에 의한 일정한 값 (약 $2 \sim 4 \text{ cm}^2/\text{gcm}$)이다.

<그림-9>는 관찰한 분쇄기들 중 하나에 있어서 입도 분포의 변화를 나타내며 통과분 ϕ_{80} 과 ϕ_{50} 의 과정은 <그림-10>에 주어져 있다. 그 곡선은 방정식 (18)로 표현된다.

$$\phi = \frac{\phi_0}{Kx^n + 1} \dots\dots\dots(18)$$

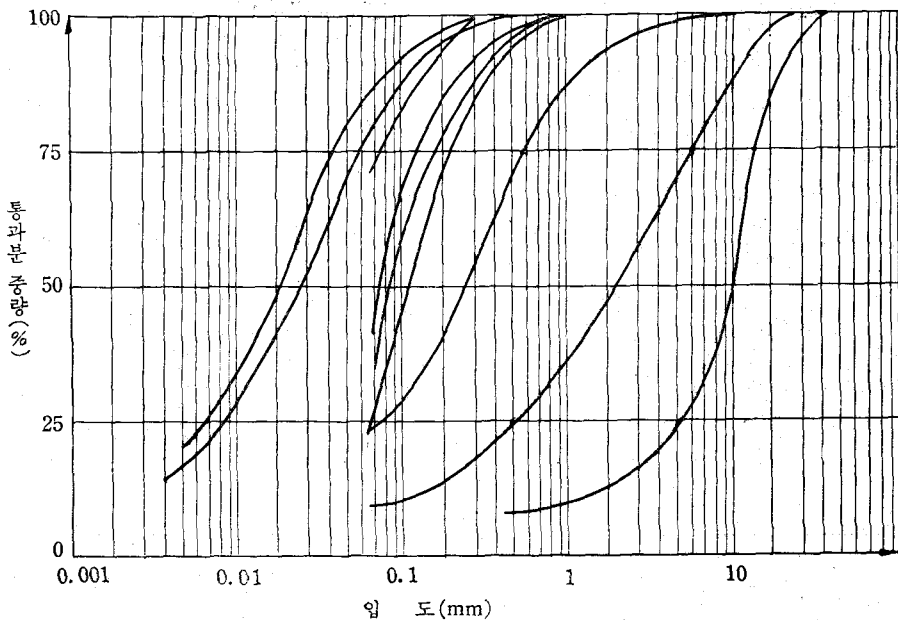
[$n \approx 2$, $\phi_0 =$ 최초의 칫수]

분쇄기에 있어서 진행 거리에 따른 線形의 비표면적이 상승하는 변화 $\phi = f_1(x)$ 는 만일 우리가 비표면적과 통과분 (예 ϕ_{80})의 수학적 관계를 안다면 방정식 (17) $S_x = f_2(x)$ 로부터 유추된다.

<그림-11>은 비표면적과 분말 변화의 두 결합을 나타내어 그것이 시멘트 분쇄기에서 어떻게 입증되는가 하는 것을 보여 준다. 이들 곡선으로부터 우리는 시멘트 크링카에 대한 式을 유추할 수 있다.

$$\phi = \left(\frac{A}{S}\right)^2 \dots\dots\dots(19)$$

ϕ_{80} 에 대한 cgs-system에 있어서 $A \approx 250$ 으로서 방정식 (19)는 또한 Kihlsted⁹⁾식에 의해 입증된다.



<그림-9> 시멘트 mill 粉碎實驗에 의한 粒度分析

$$S = \frac{K}{e\sqrt{\phi_{80}}} \dots\dots\dots 20$$

[시멘트 크링카에 있어서 $e=3.1$
이고 $K=775$]

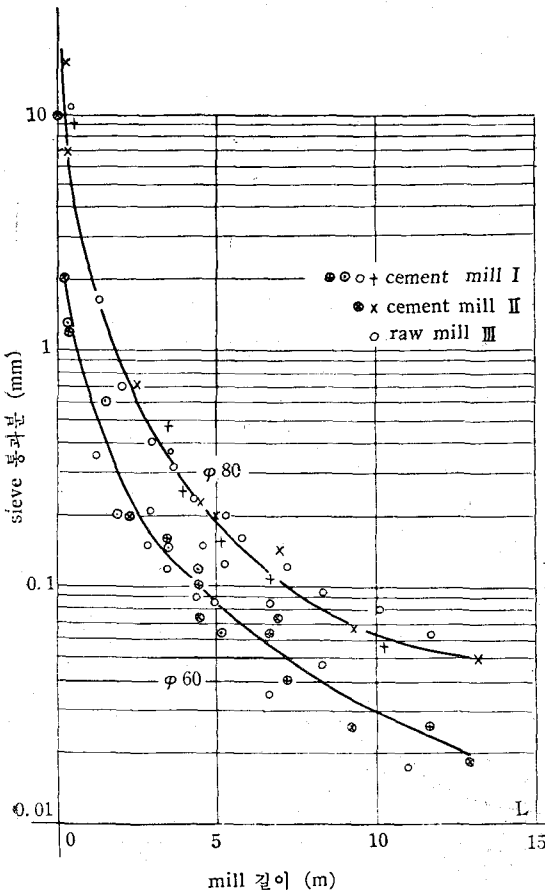
비표면적이 線形으로 진행 거리에 따라 증가된
다면 위치 x 에 있어서의 분쇄 물질—통과분은
다음과 같다.

$$\phi_x = \left(\frac{A}{S_x}\right)^2 = \left(\frac{A}{S_0 + C_x}\right)^2 \dots\dots\dots 21$$

S_0 가 보통 작고 측정하기 어려우므로 피분쇄
물 출구 표면적 S_0 를 $A/\sqrt{\phi_0}$ 로 설명하는 것은
보다 유익하다. 그러므로

$$\phi_x = \left(\frac{A}{\frac{A}{\sqrt{\phi_0}} + \frac{4S}{L}x}\right)^2 \dots\dots\dots 22$$

로 된다.



<그림-10> 현장 mill 內에 있어서 mill 位置에
따른 被粉碎物 粒度의 변화

2. grinding media 의 배열

피분쇄물의 통과분 ϕ_{80} 에 의존하는 최적의 球
直徑의 관계는 단원 III-3과 방정식 22에서 증명
된다.

$$d = \frac{b}{\sqrt[3]{B \cdot D}} \left(\frac{A}{S_0 + C_x}\right)^{0.8} \dots\dots\dots 23$$

또는

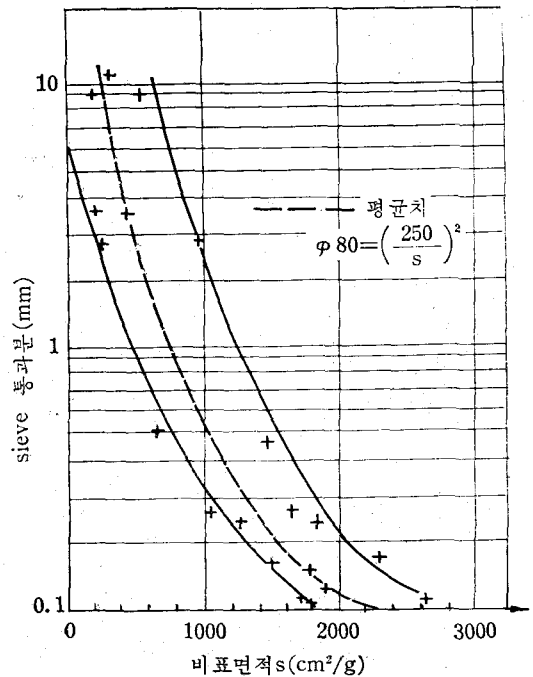
$$d = \frac{b}{\sqrt[3]{B \cdot D}} \left(\frac{A}{\frac{A}{\sqrt{\phi_0}} + \frac{4S}{L}x}\right)^{0.8} \dots\dots\dots 24$$

방정식 24에서 모든 크기는 알려지고 상수 b
의 값과 A 는 단원 III-3과 IV-1에서 나타난다.

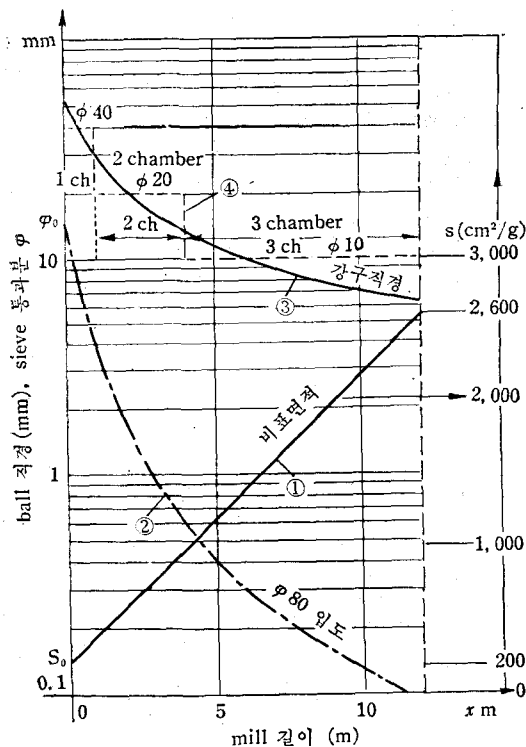
3. 실제적 적용

우리가 피분쇄물의 최초 입도와 분쇄도를 알
고 분쇄기(길이, 직경)와 원하는 입도 또는 비
표면적을 알면 거기에서 우리는 球의 배열을 가
능한 한 이론적 수치에 접근시킬 수 있게 된다.
이는 방정식 24나 또는 graph로 알 수 있다
(<그림-12 參照>).

① 우선 분쇄기 길이에 대한 blaine 의 변화에



<그림-11> 비표면적에 따른 sieve 통과분
 ϕ_{80} 의 변화(현장 mill로부터 측정)



<그림-12> 원하는 비표면적에 상응하는 chamber 길이와 강구 크기 산출을 위한 graph식 규정 방법

- 일치하는 직선을 끌어 내고(곡선 ①),
- ② 거기서 분쇄 물질 통과분 ϕ_x 를 계산하며(곡선 ②),
- ③ 분쇄기 길이에 대한 최적의 球直徑을 계산한다(곡선 ③).
- ④ 최종적으로 우리는 계단 곡선 ④ (Treppen Kurve)를 통해 연속적으로 작용하는 곡선 ③을 분할하게 되고 극한치에 보다 가까이 적용하면 그만큼 더 가치 있는 고유의 chamber 길이에 일치한다. 계단 곡선의 graph식 규정 방법은 많은 적건간에 현실적이다. 우리는 이를 규정함에 있어 다음 사실에 유의하여야 한다.
- ① 구할 수 있는 ball 크기에 따라서 그리고 mill室에 있어서 필요한 ball의 재사용 가능성에 따라서 ball의 선택을 해야 하고 그 후에 각室에의 분배에 착수하여야 한다.
- ② 가능한 한 장기간의 소모율을 고려하여 다음과 같은데 주의해야 한다. 즉 분쇄기에 적당

량 배열된 ball의 최적 정도를 일정 시간 동안 유지하기 위해 필요한 수치보다 더 큰 ball을 투입할 필요가 있다. 우리가 예를 들어 球의 투입 시 직경을 그렇게 선택한다면 한 chamber에 있어서의 최적 직경이 한번 충전으로 운전 가능한 시간의 약 반 동안을 최적으로 유지할 수 있다. 여기에 마모율의 크기가 알려져 있어야 한다.

③ 10 mm 보다 작은 ball은 분명히 출구벽 안에 있는 구멍(slot)을 통해서 배출되나 그것은 분쇄 순환 과정 때문에 손해가 아니다.

④ 분쇄기의 1室을 사전 파쇄에 사용하지 말고 분쇄기에 5~10 mm 보다 작은 사전 파쇄된 물질을 공급해야 하고 그래서 큰 球와 짧고 조잡한 chamber에 의한 손해를 피할 수 있다.

⑤ 따라서 철 주조 공장과 설계자들은 고객에게 새로운 지식에 맞는 재료를 공급할 수 있고 그것은 특히 출구벽(screen plate)과 ball을 보다 작은 크기로 사용 가능하다.

[略語表]

- D: 분쇄기 직경
- L: 분쇄기 길이
- ϕ : 피분쇄물의 입도
- ϕ_{100} : 100% 통과분 입도
- ϕ_{80} : 80% 통과분 입도
- ϕ_{50} : 50% 통과분 입도
- ϕ_0 : 피분쇄물 초기 입도
- S: 비표면적
- S_0 : 초기 비표면적
- S_x : mill 위치 x에 있어서의 비표면적
- ΔS : 비표면적 증가분
- d: 강구 직경 (diameter)
- B: 피분쇄도=일단위당 비표면적
- T: 인장력
- γ : 분쇄도
- g: 중력 가속도
- r: 원심력
- m: 강구 질량
- e: 크랭크 밀도

[참 고 문 헌]

- 1) Papadakis, M. : Recherches sur la broyabilité de la matière. Publication Technique CERILH 86, 1957.
- 2) Joisel, A. : Broyeurs à satellites. Publication Technique CERILH 79, 1956.
- 3) Joisel, A. : La rupture des corps fragiles au cours de leur fragmentation. Publication Technique CERILH 127, 1962.
- 4) Joisel, A. : Mécanique interne du broyeur à boulets. Publication Technique CERILH 51, 1952.
- 5) Papadakis, M. : La broyabilité des clinkers et son application aux broyeurs industriels. Publication Technique CERILH 100, 1958.
- 6) — : Sur l'influence de la dimension et de la forme des corps broyants sur le rendement des broyeurs à boulets.
- 7) Papadakis, M. : Contribution à l'étude des broyeurs à boulets industriels. Publication Technique CERILH 117, 1960.
- 8) Joisel, A. : Limitation du rendement de la fragmentation (dans techniques modernes de broyage) Eyrolles (Collection ANRT), 1965.
- 9) Kihlstedt, P.G. : The relationship between particle size distribution and specific surface in comminution. Symposium Zerkleinern, Verlag chemie Gmb H., 1962, 205.