

# 분쇄율에 基礎를 둔 ball mill 粉碎速度

金 尚 基

<韓一시멘트丹陽工場原粉係長>

## 1. 序

최근 選擇 함수(selection function)와 分布 함수(breakage function)를 포함한 粉碎速度論에 대한 연구 발표가 있었다.

Tanaka(1966)에 의해 提案된 새로운 概念에 기초를 두어 ball mill mechanism을 確率로 나타냈다.

여기에서는 ball mill 粉碎速度를 解析하고 最終式에서 誘導된 操作變數들간의 理論的인 관계는 經驗式이나 經驗的 사실에 의해 확인된 것을 기술하고자한다.

## 2. 一般概念

衝擊體에 粒子가 충돌하는 경우, 粉碎가 일어나지 않기 위해서는 우선

- ① 충돌하지 않아야 하고,
- ② 충돌하여 固體의 強度를 초과하는 파괴 應力을 발생할 만한 衝擊速度를 갖지 않아야 하고,
- ③ 이 條件이 충분하여도 固體內의 龜裂의 傳播가 어떠한 원인으로 완전히 장애되는 경우 등 세가지 條件이 생각된다.

더우기 ①의 衝突確率을  $P_c$ , ②의 應力이 強度를 초과하는 確率을  $P_s$ , ③의 霧圍氣가 龜裂傳播하는 確率을  $P_a$ 라 하면 이것들은 서로 獨立 事象이므로 粉碎가 일어나기 위해서는  $P_c, P_s, P_a$ 의 積이 0이 아닐 것이 필요 조건이며 이 積이 1에 가까울수록 粉碎效率은 높다.

Tanaka 報告에 의하면 1회의 衝擊에 의해 粒徑  $x$ 인 單位質量의 粒子가 增加하는 比表面積은  $\Delta S_v' = K' \cdot P_c \cdot P_s \cdot P_a \cdot x^{\beta} \dots \dots \textcircled{1}$ 이다.

where  $x$ : 粒徑(cm)

$P_c$ : ball과 粒子들간의 衝突確率

$\beta$ : 被粉碎物의 종류에 의해 결정되는 定數

$P_s$ : 파괴 강도에 관한 確率

$P_a$ : 龜裂의 傳播에 관한 確率

### 1) 파괴 강도에 관한 확률 $P_s$

ball mill 粉碎나 진동 mill 같은 集合 파괴의 경우에는 파괴 강도에 관한 확률  $P_s$ 는  $P_{app}$  apparent probability로 설명해야 한다.

ball 하나를 생각하면 ball이 落下할 때 각 粒子에 衝擊을 가하게 된다. 그리고 일부 粒子들은 파괴되고 나머지는 파괴되지 않는다. 파괴된 粒子들은 ball 아래에 있는 위치에 따라 각기 받는 應力이 다르므로 각 파괴된 粒子에 대한 平均値인 확률  $P_{sm}$ 을 정의할 수 있으며 파괴되지 않은 粒子에 대해서는  $P_s=0$ 이다. 그렇기 때문에 한개의 ball에 의해 衝擊을 받은 全粒子들에 대한 값의 平均値를  $P_{app}$ 라 하고 基本式에서  $P_s$  대신 사용한다. 더우기 粒子들이 微小時間( $\Delta t$ ) 동안에 ball과  $Z \cdot \Delta t$ 번 충돌할 때 比表面積 增加  $\Delta S_v$ (sq·cm/cc)는  $\Delta S_v' \cdot Z \cdot \Delta t$ 로 표시된다.

### 2) 龜裂의 傳播에 관한 確率 $P_a$

龜裂의 傳播에 관한 確率은 생각하지 않아도 좋다. 왜냐하면 이 効果는 특이한 gas나 粉碎助材의 흡착 때문에 표면 energy의 변화에 의해 설명될 수 있다. 그것은 物質의 압축 강도에 영향을 미치고  $P_s$ 에 포함된다.

故로  $\Delta S_v = K' \cdot P_c \cdot P_s \cdot x^{\beta} \cdot Z \cdot \Delta t \dots \dots \textcircled{1}'$

where  $Z$ : 1個의 ball이 單位時間當 ball들간이나 mill shell간의 衝突數

$x$ : 粒子的 平均徑 (cm)

mill 粉碎를 continuous process 라 생각하면 ①式에 이들 관계를 바꿈으로써 選擇 함수와 分布 함수를 포함하는 grinding kinetics 에 유사한 基本速度式을 얻는다.

$$\frac{dS_w}{dt} = K' \cdot P_c \cdot P_{sav} \cdot x^\beta \cdot Z \dots \dots \textcircled{2}$$

選擇 함수는 單位時間에 주어진 粒徑  $x$  인 粒子的 分쇄되는 重量分率로 粉碎機 中에서 만드시 分쇄되지는 않는다는 事實을 말한 것이고, 分布 함수는 크기  $x$  가 파괴되어 생성된 크기  $x'$  보다 작은 粒子的 重量分率로 일단 分쇄되면 構造에 따라서 일정한 粒度分布를 나타낸다는 뜻이다. 選擇 함수는  $P_c \cdot Z$ , 分布 함수는  $(K' \cdot P_{sav}) x^\beta$  이다.

### 3. ball mill 粉碎의 解析

#### 1) 衝突確率

衝突確率  $P_c$  를 결정하기 위해서는 2 개의 문제를 생각할 필요가 있다.

첫째는 한개의 ball 이 갖는 全粒子數  $n$  에 대한 ball 바로 밑에 있는 粒子數의 比  $f_1$  이다.  $U$  가 1 이 될 때까지는 分率  $f_1$  은 constant 로 생각해도 좋다.

$$U = \frac{\text{mill 內 被粉碎物의 總보기 容積}}{\text{ball 間隙의 全空間容積}}$$

$U > 1$  인 條件은 ball mill 이 靜止했을 때 媒體의 裝入 level 보다 媒體의 隙間을 메운 粉粒體의 level 이 위에 있음을 뜻하며 또 이때는 파잉의 粒子는 ball 바로 밑에 오려고 한다는 假定하에 이 分率이 增加한다. 이 概念은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= k_1 = \text{constant} & \text{when } U \leq 1 \\ f_1 &= \frac{k_1 n_c + (n - n_c)}{n} & \text{when } U > 1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \textcircled{3}$$

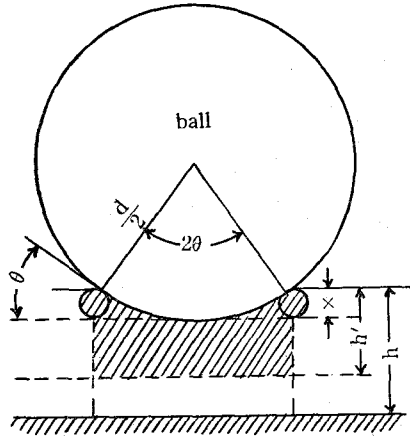
$n_c$ :  $U=1$  일때 ball 1 개가 가지고 있는 粒子數

ball 과 粒子가 갖는 空間率(void)을 각각 0.4 라고 하면  $n$  와  $U$  사이의 幾何學的 關係는

$$n = 0.4 d^3 x^{-3} U \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

where  $d$ : ball 의 直徑 (cm)

두번째 문제는 粒子가 自由落下된 ball 에 의해 물리고 있는 impact zone (粉碎 zone) 의 面積이



<그림-1> collision of a ball with particle layer in a ball mill

다. 이 面積은 <그림-1>에 나타난 바와 같이 impact model 에서 幾何學的으로 決定된다. nip 角(angle of nip)에 의해 計算된 最大值가 될 때까지 面積의 크기는 粒子 크기와 함께 增加한다. 그러므로 ball 바로 밑에 있는 粒子들이 물릴 수 있는 確率은 ball 의 斷面積에 대한 粉碎 zone 面積의 比로써 計算될 수 있다.

$$f_2 = \frac{\pi \left\{ \left( \frac{d}{2} + \frac{x}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} - \frac{x}{2} \right)^2 \right\}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4x}{d} \textcircled{5}$$

1 개의 ball 이 갖는 粒子 中 粉碎될 可能性이 있는 것은 ㉓ ball 아래에 있고 ㉔ <그림-1>과 같이 最大值가 nip 角에 의해 限定된 粉碎 zone 內에 있다.

$f_1$  과  $f_2$  는 서로 獨立의이기 때문에 ㉓, ㉔ 를 同時에 만족하는 確率  $P_c$  는  $f_1$  과  $f_2$  의 積으로 나타난다.

式 ㉓, ㉔, ㉕에서 衝突確率

$$\left. \begin{aligned} P_c &= \frac{4x}{d} \cdot k_1 & \text{when } U \leq 1 \\ P_c &= \frac{4x}{d} \cdot \frac{U + k_1 - 1}{U} & \text{when } U > 1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \textcircled{6}$$

where  $U$ : 粒子的 充填率

$d$ : ball 徑 (cm)

$x$ : 粒子的 크기 (cm)

#### 2) 衝突數

單位時間當 ball 한개의 衝突數  $Z$  는

$$Z = \frac{T_w}{T_B} \cdot N \dots \dots \dots \textcircled{7} \text{이다.}$$

where  $T_w$  : mill 1 回轉에 要하는 週期(sec)

$T_B$  : ball 이 1 回轉하여 元位置에 오  
는 週期(sec)

$N$  : mill 의 回轉速度(sec<sup>-1</sup>)

$Z$  : 單位時間當 ball 間의 衝突數  
(sec<sup>-1</sup>)

ball 의 slipping effect 를 생각하면 式 ⑦은 다  
음 형태로 쓸 수 있다.

$$Z = \frac{T_w}{T_B'} \cdot \left( \frac{V_B}{V_w} \right) \cdot N \dots \dots \dots \textcircled{8}$$

where  $T_B'$  : ball 의 미끄럼이 없을 때 원위  
치에 오는 시간(sec)

$V_B$  : mill shell 을 따라 도는 ball 의  
週速度(cm/sec)

$V_w$  : mill shell 의 週速度(cm/sec)

ball 과 mill shell 간의 slip 程度(degree of slip)  
 $S$  는

$$S = 1 - \frac{V_B}{V_w} \dots \dots \dots \textcircled{9}$$

$$\text{혹은 } \frac{V_B}{V_w} = 1 - S \dots \dots \dots \textcircled{10}$$

로 定義된다.

回轉하는 mill 에서 ball 의 slip 를 다룬 文獻을  
찾기는 어렵다. 그러나 ball mill 內에서 surging  
phenomenon(波動現象)이 slipping 과 直接 關係  
가 있다. 즉 slip 가 심하면 심할수록 파동 현상  
은 더 일어난다. 多幸히 Rose 와 Blunt(1957)는  
波動에 관한 그들의 實驗結果를 발표했다.

實驗結果에 의하면 從軸에  $J \times \mu$ , 橫軸에  $D/d$   
를 plot 하여 波動이 일어나는 범위를 확실히 나  
타냈다.

where  $J$  : mill 의 ball 充填率

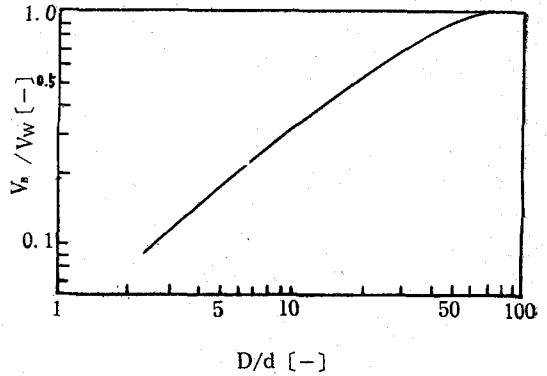
$\mu$  : ball 과 shell 간의 마찰 계수

$D$  : mill 徑(cm)

$d$  : ball 徑(cm)

$J \times \mu$  가 규정될 때  $D/d$  가 감소함에 따라 波動  
즉 slip 가 일어난다. 結果적으로 graph 에서 從  
軸이 slip 程度를 표시하고,  $D/d=1$  일때 slip 값  
이 1 이라고 가정하면 Rose 의 data 를 다시 plot  
하여 <그림-2>를 그릴 수 있다.

이 그림에 의하면 우리는



<그림-2> slipping effect in relation to  
mill and ball size

$$\frac{V_B}{V_w} = 0.065 \cdot \left( \frac{D}{d} \right)^{0.7} \dots \dots \dots \textcircled{11}$$

을 얻는다.

反面에 Rose 와 Sullivan(1958)에 의해서 回  
轉速度에 關係 없이

$$\frac{T_w}{T_B'} = 1.45 \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

로 주어진다.

mill 의 임계 속도  $N_c$ (r.p.s)는 mill 徑의 平方  
根에 逆비례한다.

$$N_c = 7.05/D^{1/2} \dots \dots \dots \textcircled{13}$$

where  $N_c$  : mill 의 임계 속도(sec<sup>-1</sup>)

실제의 回轉數  $N$ 와  $N_c$  의 比를  $\phi$  라 하면

$$N_c = 7.05 \phi / D^{1/2} \dots \dots \dots \textcircled{14}$$

式 ①, ②, ④를 式 ③에 代入하면

$$Z = 0.66 \phi \cdot d^{-0.7} D^{0.2} \dots \dots \dots \textcircled{15}$$

가 된다.

### 3) 파괴 강도에 관한 확률

衝擊 파괴 시험과 계산 결과 (Suzuki 와 Tanaka 1968, Tanaka 1966)에 의하면 ①式에 사  
용된 파괴 강도에 관한 確率  $P_\sigma$  는

$$P_\sigma = \left( 1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \right)^{1.5} \dots \dots \dots \textcircled{16}$$

으로 나타난다.

where  $\sigma_m$  : 衝擊을 가하여 한개의 粒子內에  
서 발생하는 compressive stress  
(g<sub>r</sub>/sq·cm)

$\sigma_a$  : 한 粒子의 압축 강도(g<sub>r</sub>/sq·cm)  
(이것은  $\sigma_m$  가  $\sigma_a$ 를 초과 할

때만 파괴가 일어날 수 있다는 것을 뜻한다)

粒子層內에서 應力分布과 粒子들의 일부가 파괴 응력 부족 때문에 파괴점에 이르지 못하므로 실제 파괴된 각 粒子內에서 발생한 한계한계의 응력을 정확히 평가하는 것은 매우 어렵다. 결과적으로 실제 파괴된 한계의 粒子가 갖는 energy  $E$ 는 그 ball의 自由落下 energy를 粉碎 zone內에 있는 全粒子數  $n_z$ 로 均一하게 나눈 것과 같다고 가정한다. 이리하여

$$E = \frac{1/2 mv^2}{n_z g_c} \dots\dots\dots (17)$$

이다.

- where  $m$  : ball의 무게 (g<sub>m</sub>)
- $v$  : ball의 衝擊速度 (cm/sec)
- $g_c$  : 重力換算因子 (g<sub>m</sub> · cm/g<sub>t</sub> · sq · cm)

그 energy  $E$ 가 한계 粒子의 strain energy로 완전히 바뀐다면 한 粒子內에서 發生하는 應力  $\sigma_m$ 은 다음과 같이 計算된다.

$$\sigma_m = \left( \frac{Y \cdot mv^2}{Al \cdot n_z g_c} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (18)$$

- where  $A$  : 粒子의 斷面積 (sq · cm)
- $l$  : 粒子의 길이 (cm)
- $Y$  : 物質의 young 率 (g<sub>t</sub>/sq · cm)

단 한계의 球形粒子인 경우  $A$ 와  $l$ 은 각각 단면적  $\frac{\pi}{4} \cdot x^2$ 과 粒徑  $x$ 로 쉽게 置換된다.

ball의 自由落下 높이를 mill徑으로 나타낼 수 있다는 가정에서 回轉速度의 效果를 무시하면 ball의 衝擊速度는

$$v = (2g \cdot D)^{1/2} \dots\dots\dots (19)$$

로 나타낸다.

- where  $g$  : 重力에 의한 加速度 (cm/sq · sec)
- $D$  : mill徑 (cm)

ball이 한번 충돌을 가하여 應力을 받는 全粒子數  $n_z$ 는  $P_c$ 와  $n$ 의 積에 의해 얻어진다. 式 ④와 ⑥에서

$$\left. \begin{aligned} n_z &= 1.6 \cdot k_1 \cdot d^2 \cdot x^{-2} \cdot U && \text{when } U \leq 1 \\ n_z &= 1.6 \cdot d^2 x^{-2} (U + k_1 - 1) && \text{when } U > 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (20)$$

을 얻는다.

위 關係를 式 ⑱에 代入하여

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m &= 0.91 \left( \frac{Y \rho_B d D}{k_1 x U} \right)^{1/2} && \text{when } U \leq 1 \\ \sigma_m &= 0.91 \left[ \frac{Y \rho_B d D}{(U + k_1 - 1) x} \right]^{1/2} && \text{when } U > 1 \end{aligned} \right\} (21)$$

ball의 밀도  $\rho_B$ 는 式 ⑱에  $m = \pi/6 d^3 \rho_B$ 를 代入하는데 사용된다. 그러므로

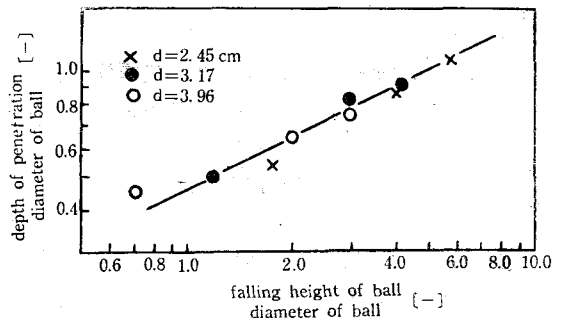
$$\left. \begin{aligned} P_{\sigma_m} &= \left[ 1 - 1.1 \sigma_m \left( \frac{k_1 \cdot x \cdot U}{Y \cdot \rho_B \cdot d \cdot D} \right)^{1/2} \right]^{1.5} && \text{when } U \leq 1 \\ P_{\sigma_m} &= \left[ 1 - 1.1 \sigma_m \left[ \frac{(U + k_1 - 1) x}{Y \cdot \rho_B \cdot d \cdot D} \right]^{1/2} \right]^{1.5} && \text{when } U > 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

더우기 衝擊을 받은 粒子들이 전부 파괴되지 않을 때를 생각할 필요가 있다. 粒子層이 아주 깊으면 (두꺼우면) 어느 한계의 깊이  $h'$ 에 있는 粒子들만이 파괴될 수 있다.  $P_{\sigma_{ap}}$ 는 粒子層의 全깊이  $h$ 에 대한 結果기 파괴도 (apparent degree of breakage)이고  $P_{\sigma_m}$ 은 실제 파괴된 粒子層  $h'$ 의 結果기 파괴도이므로  $P_{\sigma_{ap}}$ 와  $P_{\sigma_m}$ 은 다음과 같은 關係가 있다.

$$P_{\sigma_{ap}} = \frac{h'}{h} \cdot P_{\sigma_m} \dots\dots\dots (23)$$

$h'$ 의 값에 대해 考察하자. 현재 基礎研究의 부족으로  $h'$ 의 精確한 값을 추정하는 것은 불가능하다. 그러나  $h'$ 는 自由落下하는 ball이 粒子層으로 침입 (penetration)해 들어가는 데 대한 Mori와 Kojoh의 實驗 data에 의하여 유도될 수 있다.

<그림-3>에 표시된 바와 같이 그들의 結果에서 파괴된 층의 깊이  $h'$ 는 침입해 들어가는 깊이에 비례한다는 가정하에  $h'$ 는 ball徑과 mill徑에 의해 置換된 落下 높이와 서로 關連될 수 있다.



<그림-3> depth of penetration of a steel ball as a function of falling height and ball size

$$h' = k_2 d^{0.5} D^{0.5} \dots\dots\dots (24)$$

where  $k_2$  : constant

反면에  $h$ 의 값은 식 ④의 도움으로 幾何學的考察에서 얻는다.

$$h = \frac{\text{한개의 ball 밑에 있는 粒子的 겉보기 용적}}{\text{ball의 단면적}}$$

$$= \frac{\left\{ \begin{array}{l} \text{(ball 1개가 갖고 있는 ball과 ball사} \\ \text{이의 공간 용적)} \text{(粒子的 총진률)} \text{(ball} \\ \text{밑에 있는 粒子的 分容積對全容積)} \end{array} \right\}}{\text{ball의 단면적}}$$

$$= \frac{\left( \frac{\pi}{6} d^3 \frac{\epsilon_B}{1 - \epsilon_B} \right) U k_1}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

$$= 0.44 k_1 d U \quad \text{when } U \leq 1$$

where  $\epsilon_B = 0.4$ 라 가정한다.

$$\text{비슷하게 } h = 0.44(U + k_1 - 1)d \quad \text{when } U > 1 \quad (25)$$

#### 4. 最終速度式

$U$ 가 1보다 작을 때  $h$ 는  $h'$ 와 같고  $U$ 가 1보다 클 때  $h$ 는  $h'$ 보다 크다는 가정하에 위에서 얻은 확률의 값을 基本速度式 ②에 代入하여 여러가지 操作變數와 物性值를 포함하는 ball mill 粉碎의 最終式을 얻는다.

편의상 基本式 ②에서  $S_0$  대신 單位質量的 比表面積이 사용되고  $S_0$ 는  $S \cdot \rho_p$ 와 같다. 여기에서  $\rho_p$ 는 粒子的 密度이다. 그래서  $U \leq 1$ 일때

$$\frac{ds}{dt} = 2.6 k_1 \cdot K' \cdot \phi \cdot d^{-1.7} \cdot D^{0.2} \cdot x^{\beta+1} \cdot \rho_p^{-1} \left\{ 1 - 1.1 \sigma_a \left( \frac{k_1 x U}{Y \cdot \rho_B \cdot d D} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{1.5}$$

or

$$M \cdot \frac{ds}{dt} = 0.50 k_1 K' \phi L J d^{-1.7} \cdot D^{2.2} \cdot x^{\beta+1} U \left\{ 1 - 1.1 \sigma_a \left( \frac{k_1 x U}{Y \cdot \rho_B \cdot d D} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{1.5} \quad (26)$$

$U > 1$ 일때

$$\frac{ds}{dt} = 6.0 k_2 K' \phi d^{-2.2} \cdot D^{0.7} \cdot x^{\beta+1} \cdot U^{-1} \cdot \rho_p^{-1} \left[ 1 - 1.1 \sigma_a \left\{ \frac{(U + k_1 - 1)x}{Y \cdot \rho_B d D} \right\}^{\frac{1}{2}} \right]^{1.5}$$

or

$$M \cdot \frac{ds}{dt} = 1.1 k_2 K' \phi L J d^{-2.2} \cdot D^{2.7} \cdot x^{\beta+1} \left[ 1 - 1.1 \sigma_a \left\{ \frac{(U + k_1 - 1)x}{Y \cdot \rho_B \cdot d \cdot D} \right\}^{\frac{1}{2}} \right]^{1.5} \quad (27)$$

이들 식에서  $M$ 은 mill內에 있는 物質의 總量

이며

$$M = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot L \cdot J \cdot \epsilon_B (1 - \epsilon_p) U \cdot \rho_p$$

$$= 0.19 \rho_p D^2 \cdot L \cdot J \cdot U \dots\dots\dots (28)$$

로 나타낸다.

$\epsilon_B = \epsilon_p = 0.4$ 라 가정

where  $J$  : mill의 ball 充塡率

$\epsilon_B$  : ball의 공간률

$\epsilon_p$  : 粒子的 공간률

$L$  : mill의 길이

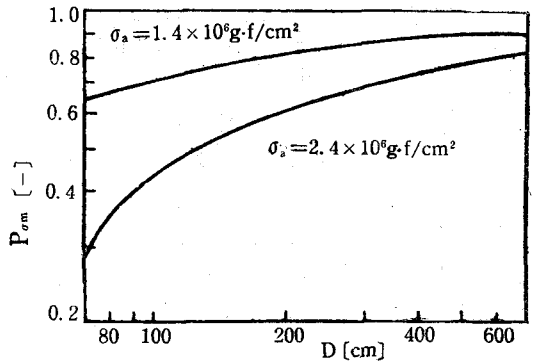
$\rho_p$  : 파괴된 물질의 밀도 (g/cc)

#### 5. 檢討

##### 1) mill 粉碎容量에 대한 mill 直徑의 效果

주어진 연속 공정에서 比表面積의 總增加速度를 일정하다고 생각하면  $M \cdot \frac{ds}{dt}$ 는 mill 粉碎容量이 된다. 이와 같이하여 식 ②과 ③을 적용할 수 있다. 이들 식에서 다른 조작 변수들이 일정하면  $M \cdot \frac{ds}{dt}$ 는  $D$ 의 單純한 함수로 나타낼 수 있다.

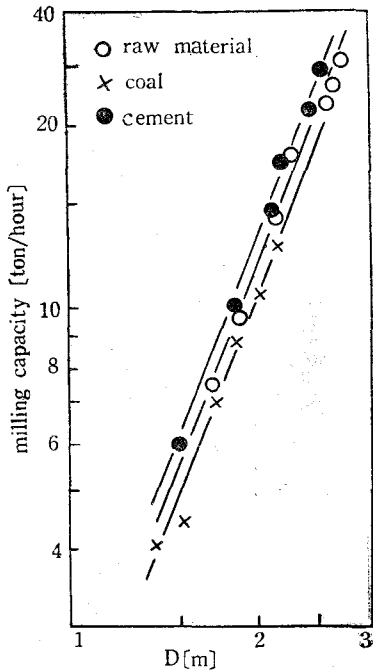
( ) 안의 값 즉  $P_{om}$ 은 <그림-4>에 표시된 바와 같이 mill徑에 따라 변한다. 이 그림에서  $P_{om}$ 은 現場 mill에 대해서 mill徑의 0.4 嚮에 大體로 비례한다. 물론 그 指數는 여러 가지 因子들에 의해 左右된다. 식 ②과 ③에 의하면 mill 粉碎容量에 관한  $D$ 의 有效嚮은 最小 2.6에서 最大 3.1이다.



<그림-4> relation between  $p_{om}$  and mill diameter  $d=5$  cm,  $\rho_B=7.8$  gm/cc,  $Y=1.9 \times 10^8$  g<sub>t</sub>/sq·cm,  $x=0.1$  cm,  $U=1$ ,  $k_1=0.2$

$$M \cdot \frac{ds}{dt} \propto D^{2.6 \sim 3.1} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

이 결과는 mill 粉碎容量이 ball mill 徑이나 tube mill 徑의 2.6 이나 3.0 冑에 比例한다고 報告된 實驗的 사실과 잘 일치한다. 연속인 tube mill 을 통과하는 plug flow 라고 가정하면 batch ball mill 에 局限된 위 檢討는 現場 tube mill 에 서 얻어진 data 에 바로 적용시킬 수 있다. 이들 mill 들은 길이가 10 m 이상이고, 완전히 혼합된 흐름을 예측할 수 없다. <그림-5>는 日本 cement 工場 data 를 plot 했다. 이 直線들의 slop 는 約 2.7 이다.

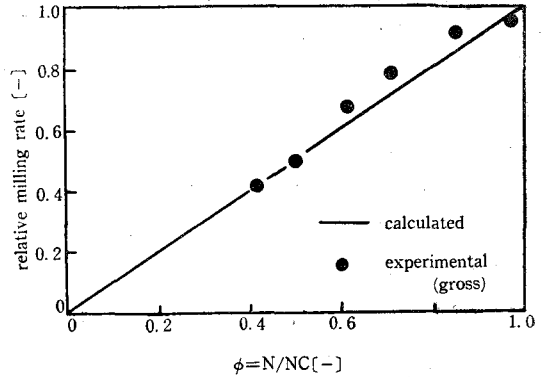


<그림-5> effect of mill diameter on milling capacity

2) mill 容量에 관한 回轉速度의 效果

式 ②7 은 mill 粉碎容量이 回轉速度에 비례함을 나타내고 있다. 그러나 엄격히 ball 의 운동은 回轉速度에 左右된다. 예를 들면 저속도에서는 서로 slipping 과 rolling 때문에 ball 들이 갈리고 임계 속도보다 높은 속도에서는 모든 ball 들이 mill shell 에 붙는다. 그렇기 때문에 어느 경우나 ball 의 自由落下衝擊을 기대하는 것은 불가능하다. 결과적으로 mill 速度 범위내에 관한 고찰은 mill

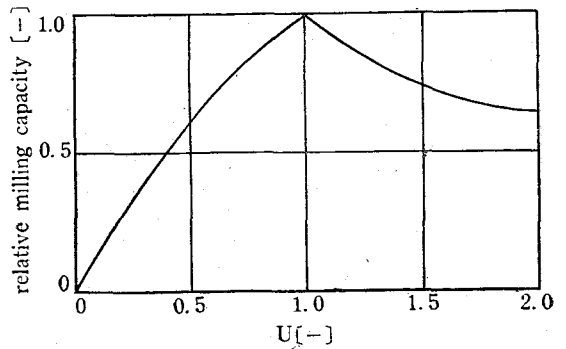
粉碎機構를 더 정확히 해석하기 위해 필요하다. 그렇지만 mill 速度에 관한 현재의 式들에 의해 추측된 mill 粉碎機構는 <그림-6>에 나타난 바와 같이 Gross(1938)의 data 에서 판단한다면 적어도 어느 한정된 범위내에서는 아주 잘 일치한다고 생각된다.



<그림-6> effect of fractional filling of balls on milling capacity

3) mill 粉碎容量에 대한 粒子 充填率의 效果

mill 粉碎容量과 U 값과의 相互關係는 ②6 式에 서 誘導될 수 있다. 이 式은 <그림-7>에서 설명된다. <그림-7>에서 최대 粉碎容量은 U 가 1 일때 얻어지는 것은 명백하다. 그러므로 가장 효율적인 mill 粉碎條件은 U=1 또는 거의 1 에 가까울 때라고 볼 수 있다. 이러한 사실은 mill 을 다루는 사람들의 경험과 잘 일치한다.



<그림-7> effect of fractional filling of particles on milling capacity

$D=200 \text{ cm}, d=5 \text{ cm}, \rho_B=7.8 \text{ gm/cc},$   
 $Y=1.9 \times 10^8 \text{ g}_i/\text{sq. cm}, \sigma_a=2.5 \times 10^6 \text{ g}_i/\text{sq. cm},$   
 $x=0.1 \text{ cm}, k_1=0.05$

또 cement 業界에서는 mill의 媒體와 cement의 重量比를 거의 6으로 하는 것이 상식으로 되어 있으며 이것은 경험적인 最適値라고 생각하는 것이 좋다. 이 條件은 다음과 같은 계산을 하여 보면  $U \approx 1$ 에서 peak가 된다.

$$R = \frac{\text{媒體重量}}{\text{試料重量}} = \frac{J \cdot \rho_B (1 - \epsilon_B)}{J \cdot \epsilon_B \cdot U (1 - \epsilon_p) \cdot \rho_p}$$

$$= \frac{\rho_B (1 - \epsilon_B)}{\epsilon_B (1 - \epsilon_p) U \rho_p}$$

where  $R=6$        $\rho_B=7.8$   
 $\rho_p=3.15$        $\epsilon_B=\epsilon_p=0.4$

上記 數値를 代入하여  $U$ 를 구하면  $U \approx 1.03$ 이 된다.

#### 4) 粒子 크기에 관한 ball의 最適徑

一般的으로 粒子가 작으면 작을수록 그 압축 강도는 더 강하다. 그렇기 때문에 만일 calcite에 대해서,  $\sigma_c = ax^b$  ( $b \leq 0$ )이고  $\beta = -0.7$ 이며  $d$ 와  $x$ 를 除外한 操作變數들이 一定할 때 式 27에 代入하면 式 29은

$$M \cdot \frac{ds}{dt} = K'' d^{-2.2} x^{0.3} (1 - cd^{-0.5} x^{b+0.5})^{1.5} \dots \textcircled{30}$$

이 된다.

where  $K''$ : 定數

$$c = 1.1 a \left( \frac{U + k_1 - 1}{Y \rho_B D} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \textcircled{31}$$

$M \cdot \frac{ds}{dt}$ 를 最大로 하기 위해  $x$ 에 관해 式 30을 미분하고 0으로 하자. 그러면

$$x = \left[ \frac{d^{0.5}}{1 + 5(b + 0.5)c} \right]^{\frac{1}{b+0.5}} \dots \textcircled{32}$$

$$\text{또는 } d = [1 + 5(b + 0.5)c]^{2x^{2(b+0.5)}} \dots \textcircled{33}$$

을 얻는다.

여로서 calcite를 crushing하는 경우 그 物性値는

$$\sigma_c = 1.4 \times 10^6 x^{-0.25} \text{ g}_t/\text{sq} \cdot \text{cm}$$

$$Y = 1.9 \times 10^8 \text{ g}_t/\text{sq} \cdot \text{cm}$$

이다. 즉  $a = 1.4 \times 10^6$ ,  $b = -0.25$ 이다.

다음 操作條件下에서 현장 mill steel에 ball을 사용하면,

$$\rho_B = 7.8 \text{ g}_m/\text{cc} \quad D = 200 \text{ cm}$$

$$U = 1 (k_1 = 0.2 \text{ 라 가정}) \text{ 일때 式 33에서}$$

$$d = 7x^{0.5} \dots \textcircled{34}$$

를 얻는다.

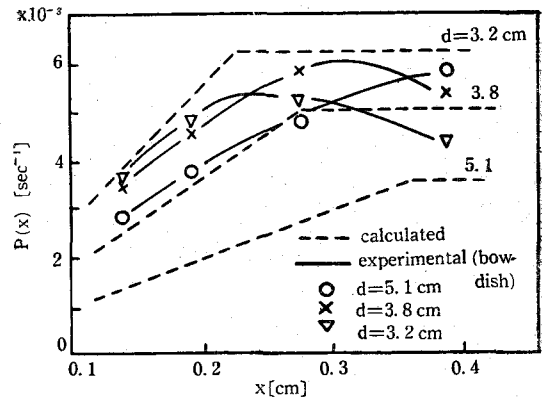
Coghil-de Vaney's 式 (Taggart, 1950)은

$$d = (9 \sim 13)x^{0.5} \dots \textcircled{35} \text{ 이다.}$$

式 35에 있어서 定數는 여러 가지 因子에 의해 左右된다고 보고되었다. 이것을 고려하면 式 34와 35의 일치는 만족할 만하다.

#### 5) 選擇 함수의 計算値와 實測値

위에 언급한 바와 같이  $P_c Z$ 는 速度論에 있어서 選擇 함수  $P(x)$ 에 상당하다.  $P(x)$ 인 濃축에 임의의 단위를 취하여 계산된 選擇 함수는, 여러 개의 크기가 다른 ball에 대한 粒子 크기의 함수로서 <그림-8>에 破線으로 나타낼 수 있다.



<그림-8> selection function in relation to particle size with ball size as a parameter

확실히 nip角  $\theta$ 가 30° 일때  $P(x)$ 가 일정 값에 도달할 때까지는  $P(x)$ 는 粒子 크기에 따라 增加한다. 이 결과는 Bowdish가 보고한 실험 결과 (1960)와 비교될 수 있다 (<그림-8> 참조).

일반적으로 ball mill에서 選擇 함수  $P(x)$ 는 粒子 크기에 따라 增加하고  $x$ 의 다른 여러 값에서 最大에 이른다. ball 크기와 curve의 일반 형태에 관한 이 粒子들 크기는 理論的인 것과 일치한다고 생각된다.

#### 6. 結論

ball mill 粉碎機構의 理論的 解析은 確率을 사용했으며 또 여러 가지 經驗的 事實들에 의해 확인되었다.

記述한 내용은 操作變數를 포함한 粉碎速度論의 발전뿐만 아니라 분쇄율을 特異한 형태의 mill의 設計, 開發, 선택에 직접 적용하도록 해야 한다.

#### Literature Cited

- Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop, Vol 9, No. 2, 1970 중 粉體 Process入門 (1969)