

ball mill의 粉碎機構에 基礎를 둔

tube mill의 大型化限界의 豫測

金 尚 基 譯

<韓一시멘트原粉係長>

譯 者 註

- ◆.....本論文은 1969년에 개최된 제 27회 cement 製造技術 symposium.....◆
- ◆.....에서 北海道大學教授 田中達夫씨가 발표한 논문이다. 지금까지.....◆
- ◆.....cement 誌에 기고된 論文 중에는 cement 製造技術 symposium 이나.....◆
- ◆.....cement 技術年報 등에 발표된 것을 그대로 번역하여 자기의 논문.....◆
- ◆.....인 것처럼 발표된 적도 많았으나 이것은 어디까지나 번역이란 점을.....◆
- ◆.....밝혀둔다. 앞으로도 田中達夫教授가 직접 보내 준 研究論文 가운데.....◆
- ◆.....데 업계에 도움이 될 만한 것이 있으면 계속 번역해 볼까 한다.◆

1. 序

tube mill의 대형화 한계의 예측에 대해서는 現在의 mill의 능력을 經驗式에 의해 판단하는 것은 위험하고, ball mill의 기초적 고찰과 이론식의 誘導를 하여, 그것을 經驗的 사실에 의해 확인하고, 그것을 사용하여 tube mill의 성능을 논해야 한다.

2. ball mill 粉碎速度式

1) 粉碎의 基礎

총괄적인 速度式에 대해 필자는 다음 식을 제안했다.

①식은 單純衝擊, ②식은 確率 P_c 를 model화한 것이고, ③식은 ball mill 같은 連續粉碎에 적용될 수 있다.

$$\Delta S \propto P_c P_o \cdot X^p \dots\dots\dots ①$$

$$\Delta S \propto P_c \left(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_m}\right)^{1.5} X^p \dots\dots\dots ②$$

$$\frac{ds}{dt} \propto P_c \cdot P_o \cdot X^p \cdot Z \dots\dots\dots ③$$

where P_o : 衝突確率

P_o : 應力 σ_m 가 強度 σ_a 를 초과하는 확률

ΔS : 比表面積 증가

X : 粒徑

Z : 衝突數(單位 時間當)

이 하나하나의 항에 대해, 우선 ball mill의 操作變數나 物性值를 이론적으로 맞추어감이 좋다.

2) 衝突確率 P_o

$$P_o \propto \frac{\pi \left\{ \left(\frac{d}{2} + \frac{X}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} - \frac{X}{2} \right)^2 \right\}}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{4X}{d} \dots\dots\dots ④$$

<그림-1>의 幾何學的 考察에 의해 ball과 粒子의 衝突確率을 계산하면 ④식을 얻는다(<그림-1>참조).

3) 衝突數 Z

③식중의 Z 에 대해서는 $Z = \frac{1}{T_b} \cdot N$ 이라 생

각할 수 있으나 ball의 미끄러짐을 고려하여 rose의 實驗値와 回轉速度 N 이 mill直徑 D 의 平方根에 反比例하는 事實을 代入하여 ⑤식을 얻는다.

$$Z = 0.66 \phi \cdot d \cdot^{-0.7} D^{0.2} \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

where d : ball 徑

D : mill 徑

N : 回轉速度

T : 週期 (T_w : 壁, T_B : ball)

ϕ : N/N_c

N_c : 臨界速度 = $42.3/\sqrt{D}$

4) 強度와 應力에 관한 確率

②식의 P_o 중의 最大應力 σ_m 은 재료에 의해

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{Y \cdot m V^2}{\frac{\pi}{4} X^2 n_z g_c}} \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

落下 높이를 mill 直徑으로 바꾸어 놓으면

$$V = \sqrt{2gD} \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

$$n_z = n \cdot P_c \dots \dots \dots \textcircled{8}$$

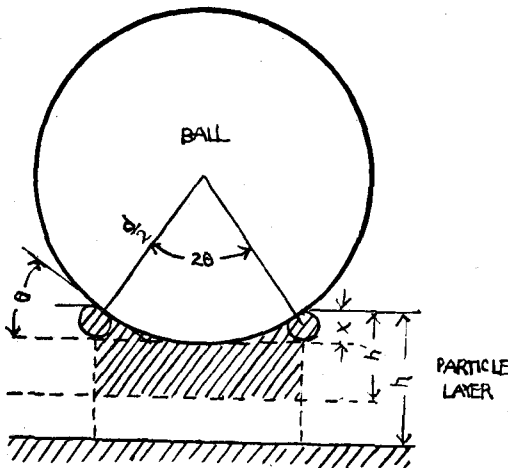
$$n = 0.4 \left(\frac{d}{X} \right)^3 U \dots \dots \dots \textcircled{9}$$

where Y : young 率

U : 粒子容積/媒體空隙

n_z : 衝突을 받는 粒子數

$$\sigma_m = 0.91 \sqrt{\frac{Y \rho_B \cdot d D}{K_1 X \cdot U}} \dots \dots \dots \textcircled{9'}$$



mill shell

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

ρ_B : 媒體密度

K_1 : 定數

但, ⑦~⑨식과 ④식을 ⑥식에 代入하면 결국 P_o 를 操作變數나 物性値의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\text{즉 } P_o = \left(1 - 1.1 \sigma_a \sqrt{\frac{K_1 X \cdot U}{Y \rho_B d \cdot D}} \right)^{1.5} \dots \dots \dots \textcircled{10}$$

5) 最終速度式과 經驗에 의한 검토

④, ⑤, ⑩식을 ③식에 代入하면 速度式을 얻을 수 있다.

$$\frac{ds}{dt} \propto \phi \cdot d^{-1.7} \cdot D^{0.2} \cdot X^{\beta+1} \left(1 - 1.1 \sigma_a \sqrt{\frac{K_1 X \cdot U}{Y \rho_B d D}} \right)^{1.5} \dots \dots \dots \textcircled{11}$$

$$M \cdot \frac{ds}{dt} = G \propto \phi \cdot L \cdot J \cdot P_o \cdot d^{-1.7} \cdot D^{2.2} \cdot X^{\beta+1} \cdot U \left(1 - 1.1 \sigma_a \sqrt{\frac{K_1 X \cdot U}{Y \rho_B d D}} \right)^{1.5} \dots \dots \dots \textcircled{11'}$$

但, G : 粉碎能力 J : ball 充填率

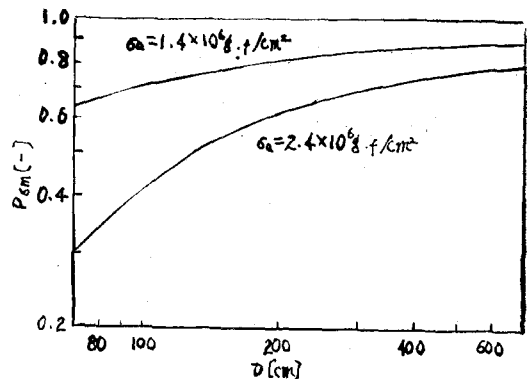
ρ_D : 粒子密度 β : 定數

L : mill 길이

⑪, ⑪'식에서 볼 수 있는 바와 같이 粉碎能力이 여러 가지 操作變數(mill 直徑을 포함)나 被粉碎物의 物性値에 의해 나타나고 있다. 이것을 각각의 變數의 경험 事實에 의해 확인할 필요 가 있다. 이하는 그에 대한 기술이다.

① mill 直徑 D vs G

mill 徑 D 는 두개의 항으로 되어 있다. ()

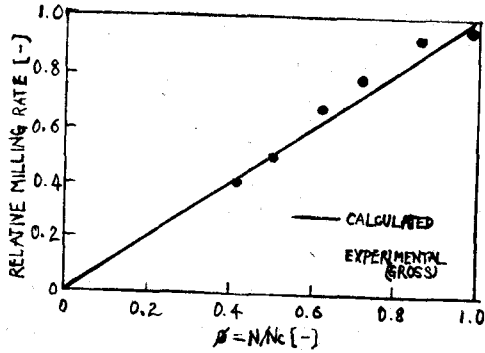


$$() \propto D^{0.3 \sim 0.5}$$

$$G \propto D^{2.5 \sim 2.7}$$

<그림-2> Dependency of parenthesis in Ec.

⑪' upon D



$$G \propto \phi$$

<그림-3> Milling rate vs. rotating speed of mill

내에 대해서 D 의 총괄적인 영향은 <그림-2>와 같다(<그림-2> 참조).

() $\propto D^{0.3 \sim 0.5}$, 따라서 ①' 식에 의해 D 의 粉砕能力에 주어지는 총괄적인 指數는 $G \propto D^{2.5 \sim 2.7}$ 으로 되고, 경험적 사실과 잘 일치한다.

② 回轉速度 vs G

Gross의 實驗値와 ①' 식의 결과를 비교하면 <그림-3>과 같이 대체로 잘 일치하게 나타난다(<그림-3> 참조). 즉 $G \propto \phi$

③ 最適媒體徑 d_{opt}

d_{opt} 를 ①' 식에서 구할 수 있게 된다.

d, X 이외를 전부 定數로서

$$M \frac{ds}{dt} \propto d^{-2.2} X^{-0.3} (1 - Cd^{-0.5} X^{b'+0.5})^{1.5} \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

$\sigma_a = QX^{b'}$ ($b' < 0$) (強度는 粒이 적을수록 크다는 사실을 고려했다)

⑫' 식을 微分하여 0으로 하면

$$d = \{1 + 5(b' + 0.5)C\}^2 X^{2(b'+0.5)} \dots \dots \dots \textcircled{13}$$

단, $C = 1.1 Q \sqrt{\frac{K_1 U}{Y \rho_B D}}$

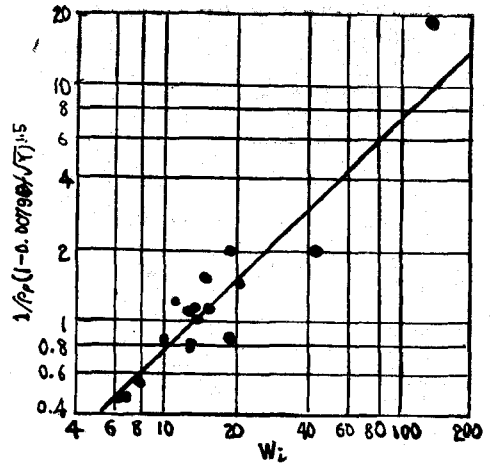
steel ball에 대해, $\rho_B = 7.8$ $U = 1$, $K = 0.2$ 를 대입하면, 예를 들어 Calcite에 대해

$$d_{opt} = 7X^{0.5} \dots \dots \dots \textcircled{14}$$

가 얻어지나, Coghill 씨의 주어진 실험식은 다음 식과 같이, 우선은 잘 일치한다.

④ Bond의 work index의 의미

①' 식에서 work index의 의미를 구해 보자.



<그림-4> Physical meaning of work index

$$S \propto 1/x$$

$$\sigma_a = QX^{-0.5} \dots \dots \dots \textcircled{16}$$

①' 식을 積分하면

$$t \propto \frac{\sigma X_p^{-(\beta+2)}}{\phi \cdot d^{-1.7} D^{0.2} \left(1 - 1.1 Q \sqrt{\frac{K_1 U}{Y \rho_B D}}\right)^{1.5}} \dots \dots \dots \textcircled{17}$$

따라서 粉砕 일 W 는

$$W \propto \frac{t}{\rho_p} \propto \frac{1}{\rho_p (1 - 0.0079 Q / \sqrt{Y})^{1.5}} \dots \dots \dots \textcircled{18}$$

단, 操作變數의 각각의 値는 Bond가 지정한 mill의 그것들을 대입한다.

한편, Bond의 式(第3法則)은

$$W = W_i \left\{1 - \left(\frac{X_p}{X_f}\right)^{0.5}\right\} \sqrt{\frac{100}{X_p}} \dots \dots \dots \textcircled{19}$$

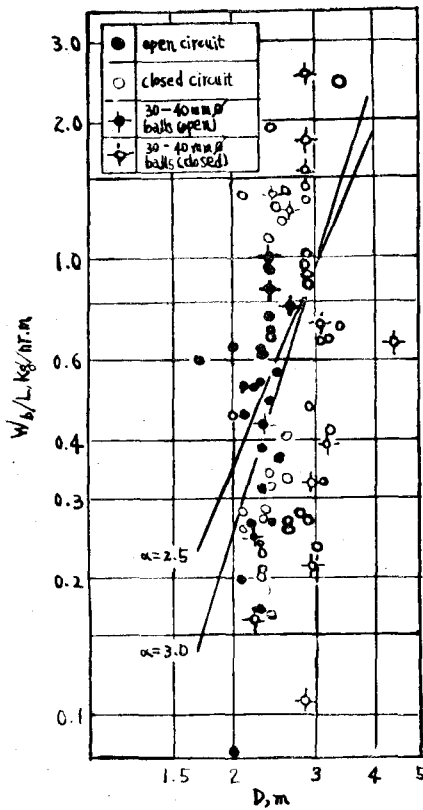
$W \propto W_i$ (X_p, X_f 는 주어지고 있는 ⑮' 식에 대응하므로)

그러므로 ⑮' 식과 조합하여

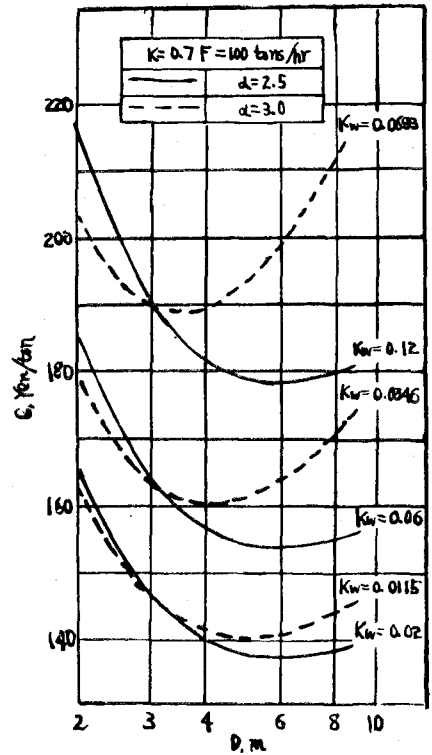
$$W_i \propto \frac{1}{\rho_p (1 - 0.0079 Q / \sqrt{Y})^{1.5}} \dots \dots \dots \textcircled{20}$$

이 식을 검토하기 위해 $\rho_p \cdot Q$ (壓縮強度의 値), Y (young 率)를 알고 있고, 따라서 Bond의 W_i 가 주어지고 있는 모든 물질에 대해 ⑳' 식을 써서 계산하면 <그림-4>와 같이 좋은 直線關係(比例)를 얻고, 여기에서 物性値에 의한 ①' 식의 검토가 되었다고 말한다.

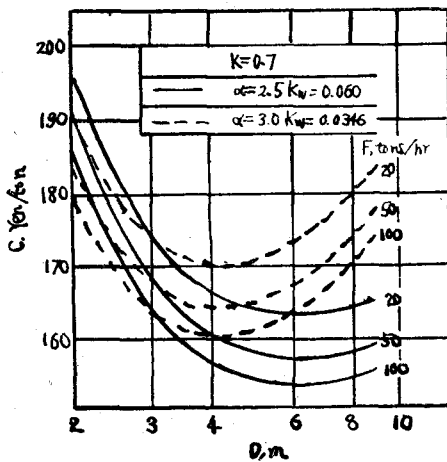
더욱 work index의 의미는 固體破壞의 mechanism을 나타내는 직접의 物性에 의해 支配되어 있는 것을 안다(<그림-4> 참조).



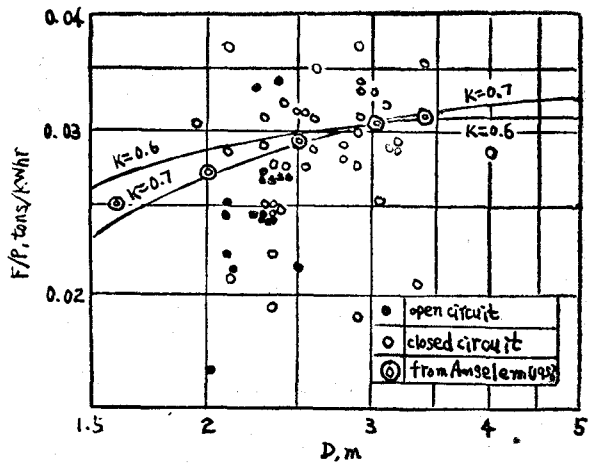
<그림-5> Wear of ball vs. mill diameter



<그림-7> Calculated cost vs. mill diameter



<그림-6> Log. Plot of mill efficiency vs. mill diameter



<그림-8> Calculated cost vs. mill diameter

3. tube mill의 最適直徑의 예측

이상의 ball mill의 식에 의해 tube mill의 경제적 문제를 생각한다.

1) 經濟收支

$$C = \{aP + bW_b + C_m/T\} / F \dots \dots \dots (21)$$

where C : cost P : 動力
 W_b : 摩耗 T : life time
 C_m : capital cost
 b : ball의 單價

a : 動力單價

F : feed

㉑식의 각항 (右邊)에 대해

$$P = K_p \cdot D^{2.5} L \dots\dots\dots ㉒$$

$$W_b = K_w \cdot D^a \cdot L \dots\dots\dots ㉓$$

$\alpha=2.5, \alpha=3$ 을 대입한다 (<그림-5>를 보아도 한 식으로 나타낼 수 없다).

$$C_m = K_m \cdot P^{0.73} \\ = 9.7 \times 10^5 P^{0.73} \text{yen} \dots\dots\dots ㉔$$

2) mill의 效率

㉑식에서

$$\frac{ds}{dt} = KD^{0.2} S^{-(\beta+1)} \{1 - K_2 \sigma_a S^{-0.5} D^{-0.5}\}^{1.5} \dots\dots\dots ㉕$$

$$\sigma_a \propto S^{0.5}$$

$$\tau \text{ (mill內 滯留時間)} = K^3 D^2 L/F \dots\dots\dots ㉖$$

을 써서 ㉕식을 積分하여

$$L = K_s \cdot D^{-2.2} (1 - KD^{-0.5})^{1.5} F \dots\dots\dots ㉗$$

$$\therefore \frac{F}{P} = \frac{1}{K_s \cdot K_p} \cdot D^{-0.3} (1 - KD^{-0.5})^{1.5} \dots\dots\dots ㉘$$

이 식에서, 다음의 경험식을 사용하면 K의 값이 평가된다.

$$\frac{F}{P} \propto D^{0.1 \sim 0.2} \text{ (} D=1.5 \sim 3 \text{ m)의 범위에}$$

서 양식을 함께 만족하는 K의 値는 $K=0.6 \sim 0.7$

이라는 것을 알 수 있다.

<그림-6>의 日本 cement 協會에서 얻어진 값은 獨逸의 Anselem의 data 및 우리들의 식에 $K=0.6 \sim 0.7$ 을 쓴 결과와 일치함을 나타낸다. 이상의 모든 항은 mill直徑 D의 함수로서 ㉑식에 대입하여 계산된다.

3) 最終計算式

$$C = [aK_p \cdot K_s \cdot D^{0.3} (1 - KD^{-0.5})^{-1.5} + bK_s \cdot K_w \cdot D^{\alpha-2.2} (1 - KD^{-0.5})^{-1.5} + K_m \{K_p \cdot K_s \cdot D^{0.3} (1 - KD^{-0.5})^{-1.5}\}^{0.73} F^{-0.27}] T^{-1} \dots\dots\dots ㉙$$

但, 定數는

$$\left\{ \begin{array}{l} T=20 \text{ years} \\ K_p=7.7 \text{ (日本 mill의 data)} \\ K_s=1.5 \text{ (日本 mill의 data)} \\ K_m=9.7 \times 10^5 \text{ (Dettmer의 data)} \\ a=3.5 \text{ (¥/KwH)} \\ b=100 \text{ (¥/kg) (概算)} \end{array} \right.$$

계산 결과는 <그림-7, 8>에 나타낸 바와 같이最適徑은 大體 5~6 m인 곳에서 나타나고, 그것 이상 증가하여도 別效果가 없음을 알 수 있다.

이점에 있어서는 단단한 양질 재료 (耐摩耗)의 출현이 key point 라고 생각된다.

近 着 外 國 圖 書

● MODERN ASIA, September 1971

1. South Vietnam: Helping Hands
2. Singapore: Room to Spare
3. India: Springing Ahead
4. Australia: After Their Quarry
5. Taiwan: Pooled Resources
6. Japan: Magnetic Field
7. Thailand: Celadon Revival
8. FEATURES
 - Money Matters
 - World solutions to world problems
 - Asia Cools Down
 - Beating the heat
 - Making Tracks
 - Losing steam

● MODERN ASIA, October 1971

1. Hong Kong: Container Pioneers
2. Taiwan: The French Lady
3. Ceylon: Gem Country
4. Thailand; Keeping In Touch
5. Japan: Flying High
6. FEATURES
 - Trade Priority
 - The U. S. looks East
 - Ready For Trouble
 - Center for disaster relief
 - Aid For Asia
 - Assessing the Colombo Plan