

Ball mill 粉砕에너지 理論式的 現場比較

雙龍洋灰工業株式會社
東海工場 生産課

方 漢 佑

1. 粉砕에너지의 概要

Ball mill 粉砕에서의 그 에너지 Source 는 電力이며 이는 Motor로부터 Reduction gear, Shaft 등의 動力 전달機構를 通한후 Mill 에 전달되고 여기서는 Steel Ball群에 어떤 運動을 계속적으로 부여하게 되므로서 Crushing과 grinding이 行하여지게 되며 따라서 그 粉砕目的을 달성하게 된다.

그런데 이러한 粉砕에너지의 전달 및 소모과정에서 Mill의 정밀 Heat balance를 通한 電力에너지 소모상태의 調査研究結果는 대충 다음과 같은 것으로 밝혀졌다.

粉砕 研究의 焦點은 역시 가장 效率的인 最低價의 操作으로 最大의 效果를 얻으려는데 있으므로 現場에서 가동操作費를 最大限 낮추기 위해서는 그 기초理論의 研究와 開發 應用이 가장 바람직한 일이다. 여기서는

① 지금까지 나와있는 Ball Mill 粉砕 에너지에 관한 여러式中 現場實際値에 가장 잘 따르고

내 용

1. 粉砕 에너지의 概要
2. Bond의 理論式과 實際
3. Allis-Chalmers 社式的 檢討
4. Barth式的 比較
5. Rose의 理論式

표 1. Mill의 에너지 손실

항 목	손실량 (100%)	비 고
Motor, gear, shaft 등에서의 손실량	12.9	동력전달 機構에서의 loss
Mill 出口 粉砕物이 갖고나가는 熱量	48.0	電力에너지가 Steel Ball운동으로 熱로 變換후 사라짐
순환 공기가 갖고나가는 熱量	31.0	
Mill에서의 손실	6.0	
기타 잡손실	2.0	
粉砕 有效에너지	0.6	

있는 것으로 알려진 Bond, Allis-chalmers 社式, Barth, Rose 등의 實驗式을 現場의 實際와 比較 檢討해 본다.

② 그러므로 現場응용이나 比較資料가 되기 곤란한, 즉 學術的인 가치면에 더 치중되어 있는 一般에너지 理論式은 여기서 제외하고 Steel Ball에 따른 에너지 소모량관계만을 다루어 본다.

③ 比較用 테이터는 S—工場 시멘트 Mill (3200kw×86t/h)의 것을 사용한다.

2. Bond의 理論式과 實際

Steel Ball의 ton 당 必要한 動力量을 따져놓은 Bond의 式으로서 Mill의 직경과 Steel Ball 층 厚, 그리고 임계속도에 對한 Mill의 회전비를

로서 성립시켜 놓은 다음과 같은 식이 있다.

Bond식

$$Kwb = 10.8 \times 2.8 \times D^{0.4} (3.2 - 3VP)$$

$$C_s \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10C_s}}\right) \text{ (kw/t-ball)}$$

where

Kwb [Steel Ball Ton當 必要한 動力量]

D [Mill의 dia, In feet] (13.8)

VP [Steel Ball 충전율 %] (29)

C_s [임계 속도에 따른 Mill의 회전비율] (60, 727)

以上の 식에다가 S-工場 Cement mill에서 얻어진 값들을 넣고 計算하면

$$Kwb = 10.8 \times 2.8 \times 13.8^{0.4} (3.2 - 3 \times 0.29)$$

$$0.727 \left(1 - \frac{0.1}{2^{9-10 \times 0.727}}\right) = 14.118 \text{ (kw/t-ball)}$$

그러므로 Steel Ball이 約 200 t 충전된 상태에서의 所要動力은

$$14.18 \times 200 = 2836 \text{ (kw)}$$

이를 Mill Motor의 Input으로 환산한다. 이때 표 1에서의 結果처럼 동력전달기구에서의 loss를 12.9%로 본다면 Mill自體의 Input는

$$2836 \times \frac{1}{(1-0.129)} = 3250 \text{ (kw)이다.}$$

그러나 現場적산전력계기에 依한 실측치는 2950kw로서 Bond식에 依한 計算치는 實際보다 큰값이 된다.

3. Allis-Chalmers 社식의 檢討

Mill의 Steel Ball 量과 관련하여 그 消費動力 量을 計算하는 式으로서 종전부터 자주 使用되고 있는 方法中의 하나로서 아리스차마스社式이 있다.

아리스 차마스式

$$HP = \frac{W \cdot C \cdot \sin \alpha \cdot 2\pi \cdot N \cdot L}{3,000} \dots\dots\dots(1)$$

where

HP (Mill의 所要動力量)

W (weight of grinding charge and material per feet of mill length)

C (Distance in feet from center of mill to the center of gravity of the grinding media)

N (Speed in rpm) (14.7)

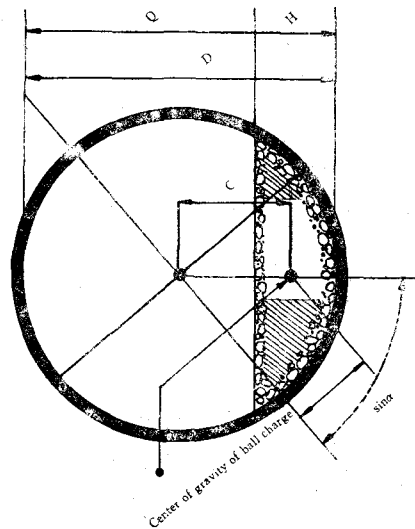
L (Effective length of mill in feet)

D (Mill dia, inside liners, in feet) (=3.95m)

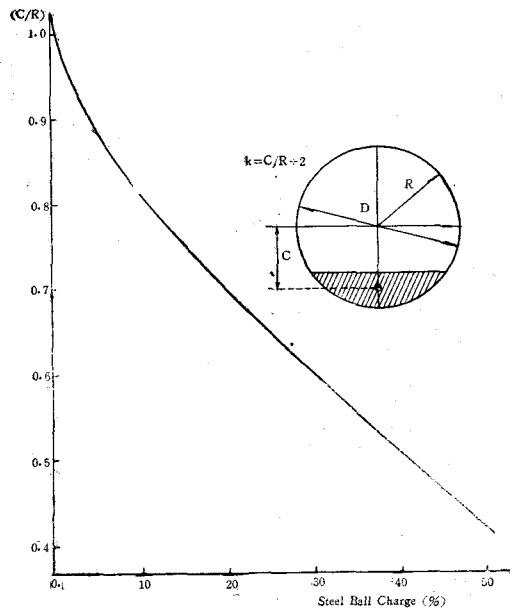
H (Height of charge, expressed in feet)

Q (Max, vertical distance from top of charge to shell liner)

33,000 (1HP=33,000lb-ft/min=4.5t-m/min)



現場에서 얻어진 값을 취하여 計算해 본다. 우선 앞의 Allis 식 (1)은 다음과 같이 變型시킬 수 있다.



(1) 식으로부터

$$IP = \frac{W \cdot K \cdot D \cdot \sin\alpha \cdot 2\pi \cdot N}{4.5} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 $K=(C/R \div 2)$ 는 Steel Ball 충전율에 따라 변하는 계수로서 Fig3에 Plot된 값(충진율 30%)을 이용하고, $\sin\alpha=45^\circ$ 로 하면 0.7071이 되며 Steel Ball은 190~200t 이었다고 보면 이때의 Ball과 粉碎物의 총 무게는 Stall Ball 무게의 1.1배로 하게 되며, 또한 $W=W \cdot L$ 이 된다. 그리하여 이들을 넣어보면

$$IP = \frac{210 \times 0.3 \times 3.95 \times 0.7071 \times 6.28 \times 14.7}{4.5}$$

$$= 3600$$

$$= 2650 \text{ [kw]}$$

여기서 Bond식의 경우와 동일한 이유로 Input으로 환산한다.

$$2650 \times \frac{1}{0.871} = 3045 \text{ [kw]}$$

이때 현장 변전실 적산전력 實測値는 2950kw로서 計算結果에 大略가까히 있음을 알 수 있다

4. Barth 式의 比較

Tube mill에서의 所要동력을 計算하는데 있어서 그 總所要動力量은 Steel Ball을 一定의 높이까지 올리는 데 要하는 動力 N_1 과 Steel Ball에 所要回轉速度 γ_w 를 주는 데 必要的 動力 N_2 로 구성된다고 할 때 Barth는 Mill의 회전수를 $n=32/\sqrt{D}$ (75.5% Critical Speed)라는 조건하에서 理論的인 式의 誘導를 통하여 다음과 같은 實驗式을 얻었다.

Barth 式

$$N = N_1 + N_2 = S \cdot W \cdot \sqrt{D}^{1.1P}$$

where

W [Steel Ball charging in ton]

D [Mill dia, in meter]

S [Power factor]

Power factor [S]

		충진율		
		20%	30%	40%
Power factor	큰 볼	11.0	9.9	9.5
	작은 볼 실 펌	10.6	9.5	8.2

그런데 Barth는 그의 實驗을 통하여 Power factor S를 다음과 같이 나타냈다.

그러나 위의 Barth 실험치는 現場計算값에 비하여 매우 높은 事實이 밝혀졌다.

이를 가장 一般的인 충전율인 30%에서 現場計算을 해보면

$$N = S \cdot W \cdot \sqrt{D}$$

$$\therefore S = \frac{N}{W \cdot \sqrt{D}}$$

$$= \frac{2950}{210 \times \sqrt{4.0}}$$

$$= 7.3 \text{ 으로 되는데}$$

Barth의 實驗値는 충전율 30%에서 큰볼과 작은볼의 평균 Power factor는 9.7이 되며 이는 현장계산치보다는 25% 가량이 높은 값이다.

따라서 이를 보정해 주어 實際必要的 動力 N' 는 0.75N이 적당하겠으나 Mill을 設計 및 運轉하는 데는 여유가 必要하므로 이를 고려하여 0.80N으로 함이 적당할 것이다.

$$\text{즉 } N' = 0.80N = 7.3 \cdot W \cdot \sqrt{D}$$

이 Barth의 式은 Allis式과 그 原理가 同一하다. Allis式을 전개 變型하면 Barth式이 되어 버리며 다만 여기서 계수인 Power factor의 값만이 다르게 될 뿐이다.

5. Rose 의 理論式

Rose는 그의 粉碎所要動力에 관한 研究와 實驗을 통하여 많은 變數를 次元解析에 따라 整理한 후 實驗的으로 다음과 같은 Rose의 式을 發表하였다.

Rose의 式

$$\left(\frac{P}{D^5 N^3 \rho_B} \right) = K \left(1 + \left(\frac{0.4 \rho_M}{\rho_B} \right) \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{N_C}{N} \right)^2 \phi(J) \right)$$

where

D [Mill dia in meter] (4.2m)

L [Length of mill] (12.5m)

N [rpm of mill] (14.7)

N_C [Critical Speed] $(42.3/\sqrt{D})$

ρ_B [Steel Ball의 비중] $(7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)$

ρ_M [原料의 比重J (크랑카: $3.15 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

J [Ball charging ratio] (0.29)

ϕ (J값에 따라 定해진 계수로서 Fig 4참조)

K (Const 3.13)

P (所要動力)

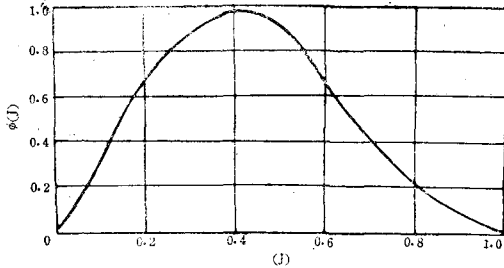


Fig-3 Steel Ball 충전율에 따른 $\phi(J)$

따라서 이를 現場에서 얻어진 값으로 計算하면

$$P = (4.2)^5 \frac{(14.7)^3}{60} \times 7.8 \times 10^3 \times 3.13$$

$$\left(1 + \frac{0.4 \times 3.15}{7.8}\right) \left(\frac{12.5}{4.2}\right) (0.727)^2 \times 0.85$$

$$= 274 \times 10^4 \text{ (kgm}^2/\text{S}^3)$$

$$= 274 \times 10^4 \times \frac{1}{9.8} \text{ (kg-m/S)}$$

$$= 28 \times 10^4 \text{ (kg-m/S)}$$

$$\ast P = 28 \times 10^4 \times 98.1 \times 10^{-4}$$

$$= 2750 \text{ (kw)}$$

여기서 Bond式의 경우와 同一한 이유로 Mill motor input로 환산한다.

$$2750\text{kw} \times \frac{1}{0.871} = 3160 \text{ (kw)}$$

적산전력에 依한 現場實測値는 2950kw로서 理論式에 依한 計算結果가 實測値보다 높다는 것을 알 수 있다.

近着外國文獻

◎ Rock Products 美國 march. 1970

1. Diesels prove economical for short haul
2. Sorting lime stone electronically
3. Quarrying highlighted at NLI Operations Day Session
4. Trends in technology of Cement Manufacture
5. NCSA Concentrates on environmental control

◎ The Indian Concrete Journal

印度 Feb. 1970

1. Microcracking and the strength of concrete
2. Construction of a mess building with folded plate roof at the Southern Forest Rangers College in Coimbatore
3. The unusual new pilgrim Church of Neviges
4. Data for analysis and design of circular shell structures.
5. Foreign news

◎ The Indian Concrete Journal

印度 March. 1970

1. Trends in joint design for concrete

pavements

2. stiffness of reinforced concrete beams under combined bending and torsion and under bending and shear

◎ Cement Lime and Gravel

英國 March. 1970

1. In-place strength of Concrete: a Comparison of two test systems
2. Materials handling for Ready Mixed Concrete
3. Study in crushing and Grinding
4. Cement and Concrete in South Africa
5. New Equipment

◎ Industrial World 美國 May 1970

1. Economic indicators Compare 140 Countries
2. Achema: World's fair for the Chemical Industry
3. Plant Engineering Production
4. New Product Review
5. Business opportunities