

Ball Mill 粉碎의 理論과 實際

—The theory of comminution and the actual operation—

雙龍洋灰工業株式會社

東海工場 生産課

成 秀 慶

目 次

1. Ball mill 粉碎研究의 近況
2. Ball의 크기와 공급물의 크기
3. Mill의 회전수와 Ball의 충전률
4. 最大 Ball 徑의 理論的 計算과 실제
5. Mill內 Ball의 分布
6. Ball의 磨耗와 adding

1. Ball Mill 粉碎研究의 近況

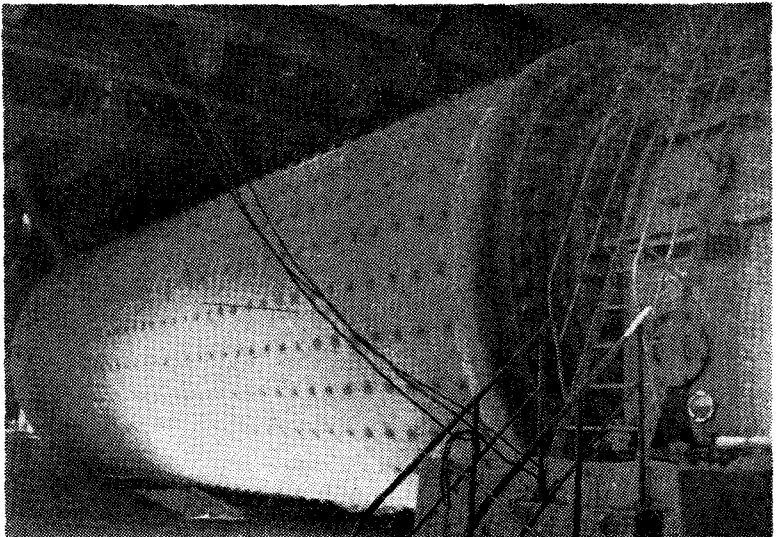
1857年 Rittinger에 依해서 처음으로 粉碎에 對한 체계적인 理論이 발표된후 계속하여 kick等を 비롯한 여러명의 이관계 研究者들이 粉碎를 研究해왔다. 한동안 별진전을 보지 못하고있던 粉碎의 研究는 1950年代에 이르러 활기를 띄우기 始作하여 여러 面으로 깊은 발전을 보였으며 이미 「리팅거」와 「키크」의 理論이 실제와는 정확히 一致되지 않고 있다는 事實이 그간 學者들에 依하여 밝혀진바 있다.

또한 1950年代 이후에 Rose, Bond, olewski, coghill 등은 먼저

研究者들이 분쇄 에너지 관계에서 그친것에 比하여 보다 구체적인 면까지 파고들었는데 이는 해당 공업계 입장에서 볼때 매우 주목할만한 사실이 아닐 수 없으며 1960年代에선 Mill 內 Ball의 구체적인 Motion이 설명되고 粉碎速度論이 Martrix method에 依하여 해석 규명되어 가고있으며, 日本의 「다나카」교수 등이 이분쇄속도론에 研究를 남기고 있다.

이밖에 각 粉碎장치「메이커」들에 依한 研究도 매우 활발하다.

이에 따라, 最近경향으로서는 Cement plant 수출에 있어서, 설계제작된 장치들이 他國에 수출된 다음 더욱 효과적인 설계자료 蒐集을 目的으로 Back calculation을 면밀히 검토하기 위하여 실제 설계를 담당한 技士들을 部門別로 大量 파견 하고있는 實情이다.



Max. 90T/hr의 大型 크린카粉碎 Ball Mill

原料물질의 Size Reduction은 요업분야에서 매우 중요시되고 특히 시멘트 工場의 경우 전체 에너지 소모량의 80%가량이 Size Reduction(분쇄)에 소모되고 있다는 事實을 생각해 볼때 Crushing and Grinding에 對한 研究의 발전은 매우 바람직한 일이 아닐수 없다고 生覺된다.

國內의 경우 여러가지 現場사정으로 인하여 실제구체적인 研究의 진행이나 혹은 他研究들을 확인 해 볼수 있는 상태는 못되고 있으나 날카로운 소리를 내며 힘차게 돌고있는 Mill은 항상 現場技士들 관심의 대상이 되고 있다.

여기서는 최근 분쇄에 對하여 研究 규명된 것 중 이론적으로도 확립되고 또 실제 와도 어느정도 잘 一致하고 있는 것으로 확인된 것 들 중의 一部를 실제와 연결하여, 우선 기초적인 사항들을 内外國 각 現場 실제「테타」와 함께 이야기 하고 다음「찌리즈」에서 에너지관계와 Ball mill 大型化 경향 및 기타 사항들을 살펴보도록 한다.

2. Ball의 크기와 공급물의 크기

Ball의 크기와 공급하는 물질의 크기 관계에 對하여는 이 양자 사이에 決定的인 어떤 一定한 數式의 관계가 성립하고 있어서 여기에 잘 따르고 있다고 단정키는 곤란하다. 다만 이 관계를 따지게 되는 기초적인 개념은 Mill 內의 제일 큰 Ball이 공급되고 있는 물질중의 제일 큰 물질을 충분히 파괴시킬수 있어야만 한다는 점의 기본 사항이 되고 있을 뿐이다.

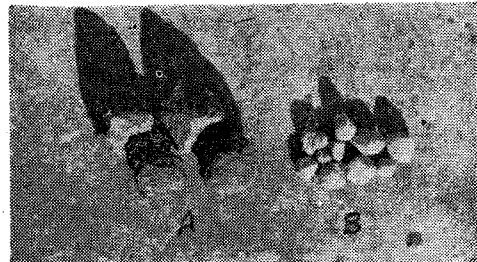
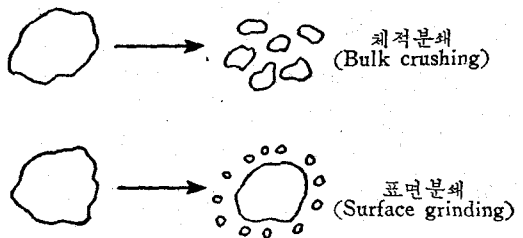
원료밀과 크린카분쇄 밀의 경우 그 공급되는 Feeding material의 粒度分布는 마이크론 단위의 가루로부터 20~40mm에 이르는 덩어리까지 매우 광범위한 Size 分布를 띄우고 뒤섞여 있다.

Mill內에서 주로 1실에서는 粗粉碎를, 그리고 2실에서 더욱 미분쇄되어진다고 말할수 있겠는데 공급되는 물질중의 굵은粒을 Mill 1실內의 큰 볼들이 몇수십조각으로 충분한 파괴를 시켜주지 못할 경우 이 굵은粒은 Ball들 사이에 끼워진 채 표면이나 모서리 等만이 마찰과 약한 충격으로 표면분쇄(Surface grinding)만을 일으킨채 그대

로 Mill內를 통과하여 밀출구를 빠져나오게된다 이와같은 굵은粒은 분쇄효율의 많은손실과 더불어 Mill內에서 점차 마모된다. 즉 粒體가 완전 파괴되어 충분한 분쇄에 이르지못하고 Ball과의 무익한 접촉으로 粒體의표면만이 마모되는 정도에 그치게 된다는 것이다.(fig 1 참조)

그리고 이 粒體는 closed-circuit의 경우, 回路를 따라 몇번이고 다시 Mill을 통과하게 된다. 이 粒體가 이러한 상태로 Mill을 통과 하여버린다면 Mill능력의 손실은 경우에 따라 대단히 커진다고 말 할수 있다.

Fig. 1



A: feeding 前의 크린카

B: 표면분쇄만을 일으킨후 밀출구에서 나온 크린카

여기서는 Feeding 되는 공급물의 크기가 어느 一定한 크기의 Screen을 80%통과한 Size F가 有効한 最大공급물의 크기라고 보고 공급물과 Ball의 크기를 따져보기로 한다. 가장 큰 粒體에 있어서 (대략 20~40mm의 크기), 이 粒體 칫수(가로, 세로, 혹은 직경)중 最少의 칫수가 바로 粒體強度를 決定짓게되는데 이 최소칩수는 앞서 말한 一定한 체를 80%통과한 有効最大크기 F와 거의 같은 크기라고 할수있게 된다.

우선 25mm(=1 inch) 크기의 Steel Ball이 一定한 체를 80%통과한 공급물질들 중의 1mm(1000 μ 혹은 16mesh) 크기의 물질을 분쇄시키는데가

장 有效한 크기라고 가정을한다.

Ball에 依해서 발휘되는 물질파괴력은 Ball 무게에 따라, 혹은 Ball직경 3승(B³)에 따라 달라 지게되며 粒體를 파괴시키는데 必要로 하는 힘 (Lb/Inch²)은 粒體직경 2승(D²)에 따라 變하게 된다.

이는 즉 25mm(≒1 inch) Ball이 1mm 크기의 粒體를 파괴시키는데 적당하고 50mm(≒2 inch) Ball은 4mm를, 75mm(≒3 inch)Ball은 9mm 크기 粒體파괴에 알맞음을 말해 주는게 된다.

이관계는 理論的으로 확실할 뿐 아니라 실제와 도 一致하고 있다.

이러한 관계의 좀더 확실한 근거는 직경 F의 粒體를 파괴시키는데 必要한 일(work)은 F^{5/2}로서 變化한다는 Bond의 第三理論(The third theory of comminution)에서 확실해진다.

일(work)이 에너지와 같다고 할때 粒體가 파괴되기前 變型거리가 粒體크기 F에 따라 變한다고 하면 粒體 파괴에 必要한 힘(Force)은 F^{3/2}(입체크기의 3/2승)에 따라 變化하게 된다.

이 관계를 F.C.Bond는 다음과 같이 정리 해 놓았다. (Table-1)

Table-1 Factors Relating Ball size and Feed size

Ball		파괴된 粒子		
Ball의 크기 B(inch)	파괴력 (wt) B ³ (unit)	粒體의 크기 F(mm)	粒體의 크기 (inch)	파괴력 F ^{3/2} (unit)
1/2	1/8	1/4	0.00985	1/8
1	1	1	0.0394	1
2	8	4	0.157	8
3	27	9	0.354	27
4	64	16	0.630	64
5	125	25	0.985	125

윗정리 결과는 Ball의 크기가 파괴된 粒子크기의 평방근에 따라 變하게 된다는 理論에 근거하고 있다.

그러나 現場에서 관찰할때 Mill자체가 大型이고 길이가 충분히 긴 closed-circuit 크린카 분쇄 밀의 경우에서도 Feed size에만 맞추어서 Ball의 크기를 決定하여 그대로 투입하기에는 여러가지 곤란한 점이있다. 너무큰 Ball을 넣게 될경우

Mill「라이나」가 깨지게될 가능성이 있어 오히려 이로 因한 비경제성도 충분히 고려해야 될 것으로 여겨진다.

3. Mill 의 회전수 와 Ball 충전률

Mill의 회전수는 Mill의 粉碎능력, Ball직경의 決定等を 계산할 때는 勿論 기타 여러가지 계산 상 매우 重要한 위치를 차지한다.

잘알려진 식으로서 밀의 임계회전수(Nc)는

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \text{ 이 있는데}$$

이는 알려진 바와 같이 Mill內에서 Ball이 一定 높이까지 따라올라갔다가 떨어지는, 즉 원심력과 Ball落下力 과의 관계를 성립시켜 따져 놓은 것으로서 이 임계회전수와 自體의 회전 수는 다른것이다.

밀의 회전수(rpm)는 보통 기계 supply 側에서 모-타와 감속기 설계에 依해서 定해져 들어오게되므로 現場에서 이 회전수를 변경시키기는 불가능한 일이다.

계산에서 많이 利用되는 것은 밀의 임계 회전수(Nc)와 밀의회전수(N)의 회전비율(Fraction of mill critical speed)인데 보통 이 회전비율(Cs%)은 67%~77%범위 內에 들고있다.

예를 들면, 직경 2.2m, 길이8m, rpm이 21.4 인 밀의경우 Cs%는

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} = \frac{42.3}{1.484} = 28.5$$

$$C_s\% = \frac{N}{N_c} = \frac{21.4}{28.5} = 75(\%)$$

즉 위밀의 회전비율(Cs%)은 75%가 되는 것이다.

또한 Nc와 Cs%는 다음식에 依해서도 간단히 얻어진다.

$$N_c = 76.6 / \sqrt{D}$$

where: 76.6...Constant K.

D는 feet로 표시된 밀의 내경

Cs(%)는

$$C_s = 0.0305 \cdot rpm \cdot \sqrt{D}$$

역시 D는 feet로 표시된 Mill의 내경 Ball의 충전률이 30% 이상 되는 습식 Ball mill에서는 이 회전비율이 最大 76~77%가량이고 습식 로드·밀(Rod mill)에서는 70%정도이다.

Closed-Circuit(閉回路) 전식 大型 Ball Mill의 경우 73~74% 범위가 알맞다고 생각되나 때로는 77%까지도 운전하여 좋은 효과를 거두는 경우도 있다.

밀의 회전속도를 증가시키면 어느 정도의 용량이 증가하지만 이와 더불어 동력소모량도 증가하게 되며 「밀·라이나」 및 「불」 등의 금속 磨耗(Metalwear)도와 粉碎톤당 cost도 증가하게 되고 로 경우에 따라서는 느린속도가 보다 경제적이기 밝혀지는 때도 있다.

그리고 中少型 전식 Ball mill에선 습식의 경우와 거의 비슷한 속도로 운전하게 된다.

데이터 1. Closed-Circuit Ball mill 中少型경우
(Closed-Circuit Cement mill)

Mill의 규격						운전 조건		
동력 (Hp)	밀의 직경 m	밀의 길이 m	L/D	rpm	Cs%	생산량 T/hr	동력 kw	충진 률%
1000	3.2	5.3	1.66	16.4	68.3	18.2	648	36.7
1400	3.5	5.2	1.49	17.3	76.0	27.0	769	33.1
1600	3.5	5.8	1.68	17.4	76.2	30.2	981	34.3
2000	3.3	12.0	36.4	16.9	71.1	37.8	1311	30.7

데이터 2. 크립카 분쇄밀 大型의 경우

조건	Mill	A	B	C	D	E
직경 및 길이(D.L)		4.6×7.75	3.9×12.0	3.5×11.24	4.2×11.24	3.8×11.5
K. W. H		3,000	2,700	2,200	3,000	2,200
kwh/t-Ball		14.3	14.2	14.7	13.9	12.2
Ball 량		210	190	150	2.6	180
最大 생산량 (T/h)		95	75	85	100	70
rpm		14.9	15.9	17.4	15.0	15.7
Cs%		77.0	74.3	77.0	72.8	71.4
L/D		1.7	3.1	3.2	2.7	3.0
충진률		※ Steel Ball의 량이 나와 있으므로 생략함				

다음은 밀의회전비율(Cs%)와 grinding media (粉碎媒體), 충전률의 관계를 圖示한 것으로 이 는 Rose에 依해 Plot된 것이다.

Ball충진률과의 관계에선 실제 어떤 조건하에서 몇%가 꼭 좋다고 하는 決定的인 수치는 표시하기 어려우나 다음에 제시 하는 데이터 1과 2, 및 도표 1을 비교검토해보면 어느정도 「아웃트라 인」의 파악이 가능하리라고 생각된다.

위에서 Mill內 충전률 계산은 다음식에 依한 것이다.

$$Vp = 1.13 - 1.26 Q/D$$

where: Vp...Ball 충전율

Q...Mill內 충전물 수평면에서

Mill 천정까지 높이(feet)

D...밀의 內徑(feet)

이는 충전률이 20%~50% 범위 내에서 확실히 적용된다.

이범위를 벗어나는 경우는 다음식을 사용하는 데 Ball의 무게와 비중을 알아야 한다.

$$\frac{w_t}{l \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \rho} = vp(\%)$$

where=l...밀의 유효길이(m).

D...밀의 유효내경(m)

ρ...Ball의 비중(보통4.5).

Wt...볼무게(톤),

이는 어떠한 경우에도 적용되는 것으로서 처음 完工된 Mill을 試運轉 할때 1/3 Ball Charging 및 2/3 Charging 時 충전률 계산에 편리하다.

4. Mill內 最大 Ball徑의 理論的計算과 실제

Mill內에서 사용되어질 Ball 中 그 最大 Ball 直徑 決定에 對하여 Bond는 Feeding Material 80% Pass 粒體直徑, Mill의 直徑과 회전수, 粉碎物의 Work Index(일指數) 等의 factor를 利用 Mill內에서 가장적당한 最大 Ball直徑 과의 關係를 따져 다음과같은 理論式(Theoretical Ball size Equation)을 推導하였다.

$$B = \left(\frac{F}{K}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{S \cdot W_i}{100 \cdot C_s \cdot \sqrt{D}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

where : B...最大 Ball直徑(Inch)

S...분쇄물질의 비중(Table 1 참조)

Wi...Work Index(일指數 Table3 참조)

D...Mill의 有效直徑(Feet)

F...Feed Material 80% Pass粒徑(μ)

K...상수(습식 350, 건식에선 335.)

위의 式은 理論的으로 推定 할 뿐 아니라 經驗적으로도 잘 따르고 있는 式으로서

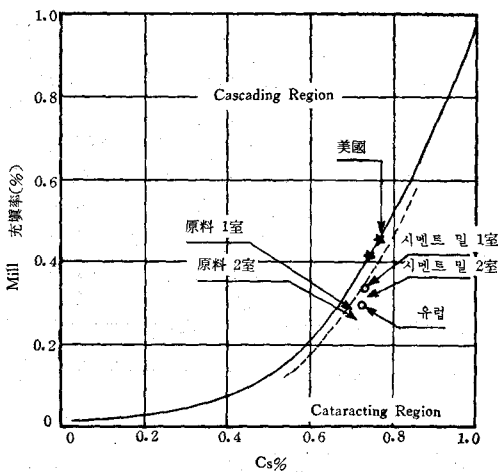
Ball Mill을 설계한후 투입하게될 最大 Ball徑을 따질때 기본식으로 最近 많이 利用되고 있으며 比較자료로서도 그 사용빈도가 매우 높다.

이러한 중요성에 비추어 윗식의 구체적인 해석을 좀더 確實히 해 둘 필요가 있다.

實例로 다음과 같은 原料분쇄 Mill에서의 最大 Ball直徑 計算 例를 살펴본다.

밀의 규격 : 4.4 ϕ × 14.3m × 3000kw × 14.4rpm × 180T/hr

圖表 1. 「밀」의 回轉數와 充塡率關係



※ Rose:Ball, Tube and Rod mill

또한 1실의 유효길이는 4.24m이고 2실은 5.26m이며 Feeding 原料의 크기는 28mm以下 90%이다.

Ball量은 1실 82 t, 2실 94 t 전부 176 t 여기서 각 Factor들의 값은

S...2.7(Table 참조),

Wi...일指數 10.57(Table 3참조)

Cs...0.7(70%)

D...Mill의 내경 13.9 Feet,

F...공급원료 80% Pass粒徑(16000 μ =16mm)

K...335,

위를 각각 식에 넣어보면,

$$B = \left(\frac{16000}{335}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{2.7 \cdot 10.57}{100 \cdot 0.7 \cdot \sqrt{13.9}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$= (47.8)^{\frac{1}{2}} \cdot (0.14)^{\frac{1}{3}}$$

$$= 6.91 \cdot 0.527$$

$$= 3.63(\text{Inch})$$

$$= 92.5\text{mm}\phi$$

따라서 위 原料 mill 1실엔 最大 Ball 直徑이 92.5mm짜리라는 계산이 나오게 되는데 勿論 이는 꼭 92.5mm짜리 Ball을 제일 큰「사이즈」로 그 대로 결정하다는 것은 결코아니다. 현재 Steel Ball Maker에서 공급되는 Ball(商品Ball)은 특별히 주문하지 않는한 보통 90mm, 80mm, 70mm... 등으로 되어 있으므로 이 경우 90mm짜리를 사용하면 될 것이다.

2실의 경우에도 역시 같은 方法으로 最大 Ball直徑이 上記式에 依해서 計算될수 있는데 다만 F의 값만이 다르게 될뿐이다.

따라서 명백해 진 바와 같이 결정적인 變化요소가 되고 있는 F값의 精確한 決定, 파악이 매우 중요하다고 볼 수 있을 것이다.

실제 현장에서 이들을 따질때, 特히 Mill을 설계한 후 Ball의 크기와 量을 定하게 될 경우 여러가지 다른「밀」의 운전실적을 參照함은 물론이며 mill의 크기와 분쇄하려는 물질의 특성등을 고려하고 앞에 설명한 식 以外 Coghill, pevaney, Starke 等의 식들을 比較하여 綜合적으로 검토한 후 결정케 되는 것이 일반적이다.

또한 여기서 예외없이 단순한 計算결과에 만의 존하여 너무큰 Ball을 넣게 될 경우엔 Mill內「라이나」가 깨져서 초래되는 비경제성을 충분히 고

려해야 할것이다.

요컨대, 위 理論式은 어느정도 실제와 잘 一致한다고 볼수 있는데,

그 이유로서 1952年 1月 2日 역시 Bond에 依해 最大 Ball직경계산에 對한 다음과 같은 경험식 (Empirical equation)이 제시되었었다.

$$B = \sqrt{\frac{F \cdot w_i}{K \cdot C_s}} \sqrt{S \sqrt{D}}$$

(但, 여기서 상수 K 값은 Ball의 경우 200, Rod에선 300. Silica Pebbles는 100이다)

이 경험식에 依한 계산결과와 앞에 설명한 이론식에 依한 계산치가 거의 一致하고 있다는 事實로 보아 더욱 확실해진다(Table 2참조)

Table 2. 最大 Ball직경 계산의 경험식 결과와 이론식 결과와의 비교

Factors					計算結果	
F (μ)	Wi	S	Cs (%)	D (Feet)	경험식 (Inch)	이론식 (Inch)
500	12	2.7	76	9.0	0.613	0.625
1000	15	3.0	75	10.0	0.990	0.973
2000	10	3.3	65	12.0	1,229	1,265
5000	13	2.9	77	8.0	2.07	2.11
10,000	11	2.8	70	11.0	2.69	2.73

다음 Table에서는 몇가지 물질의 Wi값과 그 비중을 소개한다.

Table 3. 각물질의 일指數와 비중(평균치)

Material	Work Index	Sp; gr
Bauxite	9.45	2.38
Cement Clinker	13.49	3.09
Cement Raw meal	10.57	2.67
Clay	7.10	2.23
Coal	11.37	1.63
Dolomite	19.40	2.78
Feldspar	11.67	2.59
Iron ore	15.44	3.96
Silica	13.53	2.71
Glass	3.08	2.58

※ 이밖에도 大部分 물질들의 wi값이 나와있다

5. Mill 內 Ball 의 分布

Mill 內 모든 Grinding Media(라이나 포함)는 Ball초기충진(The Initial Media Charge) 이후 혹은 보충(adding)한후 一定시간에 걸친 운전시간경과와 더불어 磨耗(Abrasion) 되며 어느 한계에 가서는 모두 꺼내어 새로운 교환 해주지 않으면 앞뒤게끔 작게 닳아 버린다.

그러므로 Mill 內의 Size 別 Ball 의 分布는 Ball 의 초기충진時나 혹은 운전중 adding 한 후를 막론하고 Mill 內에서의 Ball 배열분포의 상황과 분쇄에서의 가장 Optimum을 이룰수 있는 Ball 배열상태의 研究는 매우 중요하므로 이점 한층 명백히 해둘 필요가 있다.

Mill 內 Ball 충진에 있어서는 결국 몇mm 크기의 Ball을 몇톤씩 定하므로써 粉碎에 Optimum 을 무난히 이룰수 있는가 하는점이 중요한 문제라고 할수 있다.

현재 국내 現場에서는 당초 Plant Supply 則 이 提示한 Ball Size 別 톤수를 그대로 인계받아 되풀이 하고있는 경우도 있고 여기에 現場事情을 참작 약간의 수정을 加하여 주기적인 충진을 되풀이 하고 있는 곳도 있다.

一般的으로 Mill을 어느 일정한 기간 분쇄운전 하는 동안 그 Grinding Media의 마모상태가 어느 一定크기의 Ball만 集中的으로 마모되어버리는 것이 아니라, 깨어진 Ball(破球)들을 제외하고는 큰「볼」이건 작은「볼」이건 모두 비슷한 程度의 두께로 마모가 行해진다는 것이다. 이 마모로 인한 전체 Ball 의 重量감소를 제일 큰 어떤 Size의 Ball로서 주기적으로 代치(Replace)시켜 준다면 그 배열상태가 결국은 어떤 一定한 식에 따르는 分布를 갖은 平衡상태에 도달하게 된다.

이 Rule에 착안한 Bond는 오랜동안 시험을 거쳐 다음과 같은 경험식(Empirical equation)을 제안 하였다.

$$y = \left(\frac{x}{B} \right)^m$$

이식의 해석은, 즉 log-log paper(兩對數그라

프)上 가로축에 Ball의 직경(B)을 取하고 세로축에 Ball分布量(weight) 累積%(y)를 取하며 평행 상태의 Ball Size別 分布상태가 一定한 기울기(Slope)m을 갖는 직선으로 표시됨을 나타내는 것이다.

위식에서 B는 最大 Ball의 직경, x는 B보다 작은 任意的 Ball 직경을 나타내며 y는 이들 Ball의 累積%가 되고 m의 값은 Ball의 경우 3.84, Rod의 경우 3.01이 적용된다.

이를 펼쳐서 설명해 본다면

$$y = \left(\frac{x}{B}\right)^{3.84} \dots\dots\dots ①$$

양변에 對數를 취한다

$$\log y = 3.84 \log \left(\frac{x}{B}\right) \text{ 이는 다시}$$

$$\log y = 3.84 \log x - 3.84 \log B \text{ 가 되며}$$

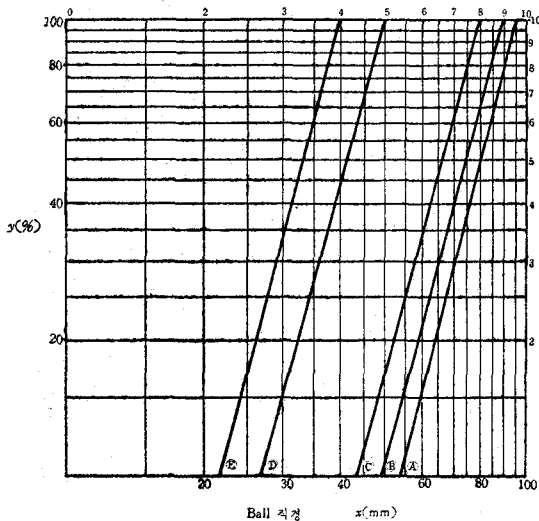
여기서 log-log 그래프의 성질상 기울기는 3.84가 되고 $-3.84 \log B$ 부분이 y축 절편이 될 것이다. (여기서 B는 알고있는 값이다)

그러므로 이절편부분을 定數 B'라하면

$$\log y = 3.84 \log x - B' \dots\dots\dots ②$$

이를 log-log 그래프상에 plot 하면 slope 3.84를 갖는 직선이 얻어지게 된다.

圖表 2. Mill 內 Ball 平均分布圖



here : ① 線 : 最大 Ball 직경이 95mm 의 경우
② 線 : 〃 90mm 〃

③ 線 : 〃 80mm 〃

④ ⑤는 각 50mm, 40mm의 경우(2실)

여기서 實例를 들어 설명해 본다면 다음의 Ball 分布 log-log 도표는 어느原料 mill의 것으로서 1실은 82 ton의 Ball이, 그리고 2실은 94ton, 모두 176 ton의 경우로서 분쇄능력은 180 t/hr의 경우를 Plot 해본 것이다(A線).

上記 도표中 A線을 읽으면 max Ball Size가 95mm로 되어있는데 이는 全 Ball中 95mm以下는 모두 100%를 의미 하게되며(누적 %이므로) 95mm 자체만의 量은 95mm와 다음크기인 90mm의 중간지점(mid-Point between The Ball size)인 92.5mm部分(두 Ball 크기간의 중간지점을 읽게 되어있다)을 가로축에서 읽고 세로 축에서 그 누적%를 읽게되면 90% 부분이 되는데 전체 100%에서 이를빼면(누적부분이므로), 즉 $100-90=10$ 이되어 95mm 짜리는 10%程度가 점유되고 있다는 사실을 곧 알게 될 것이다.

따라서 그 다음을 전부정리해본다면 다음과 같이 될 것이다.

- 95mm→10% ($100-90=10$)
- 90mm→27% ($90-63=27$)
- 80mm→25% ($63-38=25$)
- 70mm→17% ($38-21.2=17$)
- 60mm→9.5% ($21.2-11.5=9.5$)
- 50mm→11.5%

計 100%

또한 이를 톤수로 환산하면(1실 82톤이다)

95mm	10%	8.2 t
90 〃	27%	22.1 t
80 〃	25%	20.5 t
70 〃	17%	13.8 t
60 〃	9.5%	7.8 t
50 〃	11.5%	9.4 t

計 100% 82 t

2실도 마찬가지로 풀이 할 수 있다. 그러나 여기서 한가지 더 말해 둘 점은 위에 정리된 바와 같이 95mm 짜리가 꼭 10% 즉 8.2ton 이 된다는 게 아니라 95mm와 90mm 사이에 싸이즈가 전체 10%를 점유하고 이량이 8.2 ton 이 된다는 뜻이라고 볼수있겠는데, 결국 Mill 內 Ball 초기충진時에도 위와 같은 Ball 구성을 갖게될 것이 요구된다는 것이다. 그러나 전식 Single-Compartment

Ball mill의 경우는 위와같은 Rule로부터 사정이 좀 달라지고 특히 분쇄하려는 粒體크기에 비하여 Wi 값이 낮은 물질의 경우에는 다른 여러 가지 factor들을 비교 참작해야 한다.

다음 Table 4는 역시 Bond에 依해서 정리된 것으로 Ball 초기충진時 最大 Ball 직경에 따라 그이하 각 Size別 Ball의 크기를 중량%로 표시하여 나타낸 것이다.

Table 4. 초기 충진시 Ball구성

Mill內 Ball의 직경(Inch)	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5
4.5	23.0						
4	31.0	23.0					
3.5	18.0	34.0	24.0				
3	15.0	21.0	38.0	31			
2.5	7.0	12.0	20.5	39	34		
2	3.8	6.5	11.5	19	43	40	
1.5	1.7	2.5	4.5	8	17	45	51
1	0.5	1.0	1.5	3	6	15	49
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100

6. Ball의 마모와 Adding

6-1 Steel Ball 마모

금속마모(Metal wear)는 종합적으로 고찰해 볼 때 Cement 공장의 분쇄설비의 경우 第2次로 비용을 많이 차지하는 (Second largest Single Item of expense) 부분으로서 Ball을 운전해감에 따라 필수적으로 媒體의 마모도 수반되게 마련이며 이들의 마모는 생산량에 매우 중요한 영향을 미치고 있다.

그러므로 여기서 먼저 Ball과 Iiner의 마모형태를 검토해볼 필요가 있다.

대체로 이들의 磨耗機構(Mechanism of metal wear)로서는

- ① 기계적 마모
- ② 산화 마모
- ③ 溶着 溶融. 마모

等으로 크게 區別되는데 분쇄하는 조건에 따라서 그종류가 달라지는게 원칙이나 경우에 따라서는 위의 세가지가 어느정도 組合되어 發生된다는 說도있다.

W. Kayser(獨)가 제출한 마모 함수 보고서에서는 金屬組織學的인 면에서 검토를 한결과 그 마모상태가 Ball 각부분에 따라서도 차이가 많다는 結論을 얻고 이는 鍛造과정, 生자 조건(quenching), 재료의 조직 등에 따라서 많이 달라진다는 사실을 밝히나 있다.

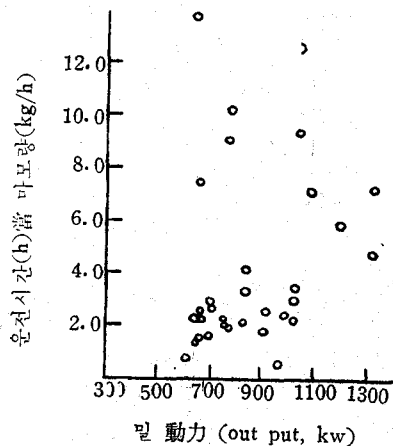
요컨대 Steel Ball 이나 Iiner의 재질을 그 조직적인 면에서 볼때, 가령 탄소함유량이 0.6~1.0% 범위라면, 이탄소가 Steel 결정구조 內에서 균일히 분포되어 있는 즉 가급적이면 Homogeneous Steel 일 것이 요망된다.

이론적으로, 혹은 경험적으로 이들 마모에 對하여는 그간 여러종류의 式이 제출되었는데 다음은 Hukki(美)가 밝힌 것으로 밀의직경, 회전속도, Ball의 크기 등의 관계를 성립시켜 Ball의 총마모량을 아래와 같이 따져 놓았다.

Ball

$$\text{Total 마모량}(W) = Cqd(0.02np - 2)npD^{2.5} \quad (\text{Lb/hr})$$

圖表 3. 시멘트 Mill



where : d...Ball의 직경, np...임계회전속도 비율(%), D...mill의 내경(feet)

Inner는

$$(W) = C^{13} (np)^m D^{(2+m/2)} \text{ (Lb/hr)}$$

(m은 1~1.5)

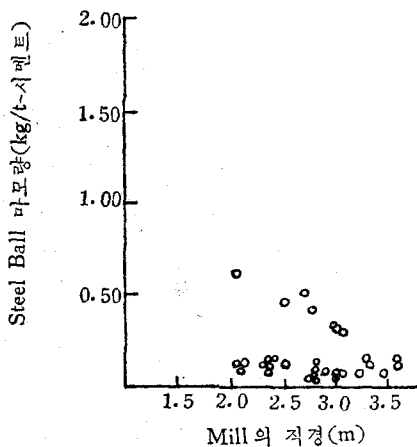
외에도 마모속도 및 마모량 등을 따져놓은 식이 여럿 있으나上記과 더불어 그精度를 확인키는 곤란하며 그보다는 오히려 각現場에서 얻어진 媒體마모량에 對한 여러가지 「데이터」를 참고 함이 훨씬 신빙성이 있으리라고 생각된다.

그러나 이러한 「데이터」 자체도 넓게는 조사된 나라에 따라, Process에 따라 다르고 좁게는 Mill의 직경, 동력소모량, 媒體충진량 등에 따라 그차이가 크기때문에 아직 확실한 技術 및 技術 「데이터」의 축적이 확립되어 있지 못한 경우에는 함부로 引用하기 곤란한 때가 있다.

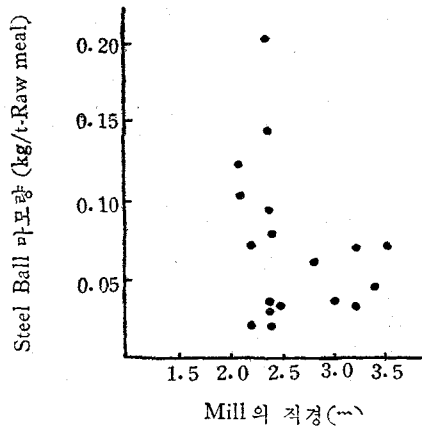
소형 mill과 大型 mill에 있어서 그 마모량의 차이가 직경이 클수록 분쇄량도 크고 (이 관계는 數式化되어 확인된바 있다) 동시에 Ball의 량도 많이 必要하게 되므로 그 마모량도 증가하게 되는 명백하다.

다음의 點綴方法으로 표시된 圖表(3.4.5.6)는 Steel Ball의 마모량을 나타낸 것으로 乾式원료 및 시멘트 밀의 경우이다.

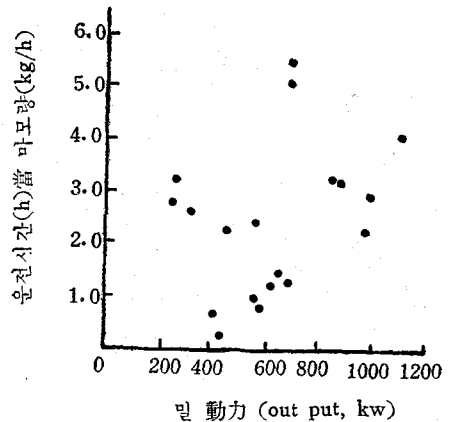
圖表 4. 시멘트 Mill



圖表 5. 원료 Mill



圖表 6. 원료 Mill



6-2 Steel Ball의 Adding (보충)

이미 앞서 論한바와 같이 Mill의 운전시간 경과와 더불어 Ball과 liner 들은 계속 마모되어져 점점 그 充진량이 줄어들게 되고 生産量과 동력소모량의 감소도 뒤따르게 될것이다.

그러므로 Mill內 Ball 량이 一定 최적조건的 level을 항상 유지 하도록 Ball을 주기 적으로 adding 해야 하게 된다.

여기서 먼저 적절한 adding 시기를 決定해야 하게 되는데 보통 決定方法으로서 다음의 5가지 항목을 기본으로 하여 그 보충시기를 定하는 것이 일반적 이다.

1. Mill의 동력소모상태

2. Mill의 空高측정(충진률파악)
3. Mill의 운전시간
4. Mill의 분쇄량(Tons)
5. Mill의 분쇄상태

위의 5個항목의 각 상태를 수시로 파악 확인하여 Ball 보충 시기와 量을 定하는 것인데 이중 Mill의 동력소모상태(1)의 파악은 기본항목이 되며 다음이 충진률(2) 체크가 보편적으로 사용되고 있다.

어느 믿을만한 外國통계에 따르면 Mill의 동력소모량 체크 하나만을 갖이고 Ball의 adding 시기와 量을 決定하고 있는 Cement Plant의 수효가 전공장수의 32% 가량이 되고 있으며 Mill內 충진률 조사를 하여 이것만 갖이고 決定하는 工場이 21%, 나머지는 기타항목 및 위의 둘을 동시에 조사하여 行하고있음이 밝혀진바 있다.

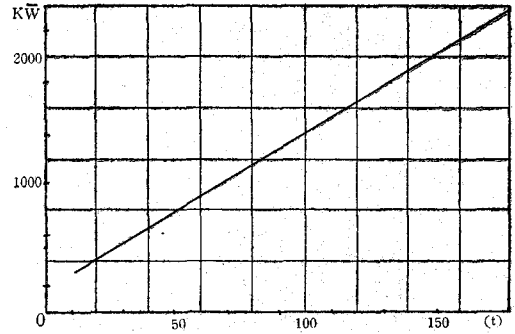
확실한 적산전력계기가 장치되어 있는 경우 1번 항목을 사용함이 간편하며 시간을 절약 할수 있을뿐더러 비교적 믿을만하다. 그러나 동력소모량 충진률을 동시에 조사하여 定하는 것이 가장 좋은 方法이라고 생각된다.

3번과 4번을 위주로 사용하려는 경우엔 어느 정도 확실한 自體工場의 Steel Ball 마모률「메이터」를 보유하고 있을 것이 요청되며 실제 사용에 있어서 여러가지 이유로 그 정확도가 의심된다.

다음 圖表7의 Steel Ball 量에 따른 전력 커브는 어느공장 원료밀의 것으로서 Ball 보충용으로 쓰이는 것이다. 위의 커브를 사용하므로써 Ball의 보충시기와 보충량을 동시에 決定지을 수 있게된다.

圖表 7. Raw mill의 전력 소모線

(3.8 φ, 11.5%, 2.200kw, 150 t Ball)



REFERENCES

- (1) F.C.Bond, "Crush. & Grind. Calculation" Allis Chalmers (1956), (1961).
- (2) H.E.Rose, "Ball, Tube & Rod mills"(1958)
- (3) R.T. Hukki, Mining Eng., 10,581(1958)
- (4) W. Kayser, Zement-Kalk-Gips 17, (11) 495 (1964)
- (5) J. Slegten, Zement-Kalk-Gips 17, (11)503(1964)
- (6) F.C. Bond, Mining Eng., Grinding Ball size Selction (5), 592(1958)
- (7) F.C. Bond, Min. Eng., Grind. Ball size select ion(5), 594(1958)
- (9) G.J. Jalbalt & V.F. Freymann, Rock Product (7) 1957

(1969. 1. 10接受)