

소형 Ball Mill에 의한 고령토의 분쇄 일지수 측정방법의 검토

심철호 · 강용식 · 서태수 *

중앙대학교 화학공학과

*한국화학연구소 무기화학부

(1986년 11월 5일 접수)

Investigation of a Method Measuring Bond's Work Index of Korean Kaolin by Laboratory Ball Mill

Chul-Ho Shim, Yong-Sik Kang and Tae-Soo Suh

Dept. of Chem. Eng., Chungang University

*Dept. of Inorganic Chemistry, KRICT

(Received November 5, 1986)

요 약

본 연구는, 실험실적 ball mill 을 이용하여 고령토의 분쇄 일지수 측정방법에 관해서 검토하고, 나아가 분쇄 효율의 측정 일란에 대한 기초 데이터를 확보함을 목적으로 한다. Ball mill 은 내부직경 133 mm ϕ , 내부길이 144 mm의 소형 batch mill 을 사용하였다.

그 결과, 특정한 규격 mill 이 아닌 실험실적 ball mill 에서도, 분쇄 일지수를 정도 좋게 추산할 수 있는 방법을 확립했다. 또한, Bond의 ball mill 분쇄능 측정시 mill 의 안정 회전수를 구하는 조작은, Miwa 의 속도식을 기초로 한 제안식에 의하여 계통적으로 행할 수 있음을 확인했다.

본 연구에서 제시된 방법에 의하면, 고령토의 분쇄일지수는 약 9.0 kwh/ton 으로 추정된다.

ABSTRACT

The purpose of this work is to establish the basic calibration data for the efficiency of grinding by investigating the Bond's Work Index employing Korean Kaolin as a reference material with the laboratory-scale ball mill. A small ordinary ball mill has a dimension of 133 inside diameter and 144 mm long.

The analysis of the experimental results in this work sets up a equivalent calibration method with the laboratory-scale ball mill to those with special mill. The theoretical expression, derived from the rate equation proposed by Miwa, is obtained to anticipate the stable revolution number for the next grinding cycle. The proposed equation is more systematic and accurate than Ishihara's empirical equation for the measurement of grindability of a ball mill.

The value of Work Index of Korean Kaolin is estimated about 9.0 Kwh/ton, based on the proposed equation in this work.

1. 序 論

분쇄기의 설계 및 분쇄조건의 결정등에 있어서 우선 해결해야 할 문제는, 희망하는 粉體(고체입자의 비표면적 증가)를 얻기 위하여 얼마 만큼의 일량이 필요하고 분쇄기에 어느 정도의 동력이 소요될 것인지, 즉 에너지 효율을 파악하는 일이다. 그러나, 이 효율은 분쇄기 분쇄조건 및 被粉碎物에 따라 큰 영향을 받게 되므로 분쇄에 소비되는 에너지와 분쇄공정, 碎料의 입도, 분쇄 생성물의 입도 및 그 물질의 물리적 성질등과 相關을 갖는다.

분쇄효율을 측정함에 있어서, 통상 일량과 입도변화의 관계를 數式化하는 일이 행해지고 있으며, 그 대표적인 예가 Kick, Ritinger, Bond의 3대 일 법칙이다. Bond의 분쇄이론은, 微粉碎를 대상으로 한 Ritinger와 粗粉碎를 대상으로 한 Kick의 이론을 組合한 것이며, 따라서 그 대상도 中間粉碎로 이해되고 있다. 그러나, 그 이론적 근거가 불명확하다는 점에서 각종 논란이 가해지고 있지만, 적용한계를 충분히 인식하여 활용하면 여러가지 유익한 정보를 얻을수 있을 것으로 기대된다. 또한, 분쇄기의 소요동력을 추산하는데 기초가 되는 분쇄 일지수(Work Index)의 측정방법이 구체적으로 표명되어 있고, 특별히 구입곤란한 장치를 사용하지 않아도 일지수를 쉽게 구할 수 있음도 편리하다.

Bond의 이론에 대해서는 널리 알려져 있음에도 불구하고, 그 응용의 기초가 되는 분쇄 일지수를 구해보는 일은 그다지 보급되어 있지 않은 것 같으며, 특히 고품질의 일지수 측정에 관한 보고는 전혀 발표되어 있지 않다.

본 연구는, 실험실적 batch mill을 이용하여 고품질의 분쇄 일지수 측정법에 관해서 상세히 해설하고, 나아가 분쇄효율 측정 일반에 대한 기초 데이터를 확보함을 목적으로 한다.

2. 理 論

2.1 Bond의 Ball Mill 粉碎能 測定에

있어서의 安定 回轉數의 推算

Mill의 안정 회전수의 예측에 있어서, 통상 단순한 비례계산에 의하는 경우가 많지만, 본 실험에 있어서 는 三轉¹⁾가 발견한 분쇄 속도식

$$R_t = R_F \exp(-b_1 t^m) \tag{1}$$

을 기초로 하여 추산했다. mill의 안정 회전수 예측계산에 이용한 모델그림을 Fig. 1에 나타내었다. Eq.(1)의 분쇄시간 t 를 mill 회전수 N 으로 나타내고 n 회 및 $(n+1)$ 회째 분쇄조작의 회전수로 대치하면, t 와 N 은 비례관계에 있으므로 다음식이 성립한다.

$$R_{N(n)} = R'_{F(n)} \exp\{-b N_{(n)}^m\} \tag{2}$$

$$R_{N(n+1)} = R'_{F(n+1)} \exp\{-b N_{(n+1)}^m\} \tag{3}$$

여기서, b 는 mill 회전수에 관계되는 정수, m 은 분쇄능에 관계되는 정수이다.

Eqs.(2),(3)을 대수형으로 변형하고, 양변의 비를 취하면 다음식을 얻는다.

$$N_{(n+1)} = N_{(n)} \left\{ \frac{\log\{R_{N(n+1)}/R'_{F(n+1)}\}}{\log\{R_{N(n)}/R'_{F(n)}\}} \right\}^{\frac{1}{m}} \tag{4}$$

Eq.(4)의 각 R 값은, Fig. 1을 이용하여 다음식에 의해서 계산할 수 있다.

$$R_{N(n)} = \frac{Q_{cl(n)}}{Q_0} \tag{5}$$

$$R'_{F(n)} = \frac{Q_{F(n)} \cdot R_F + Q_{cl(n-1)}}{Q_0} \tag{6}$$

$$R_{N(n-1)} = \frac{Q_{cl(n-1)}}{Q_0} \tag{7}$$

$$R'_{F(n+1)} = \frac{Q_{F(n+1)} \cdot R_F + Q_{cl(n)}}{Q_0} \tag{8}$$

여기서, $(n+1)$ 회째를 목표로 하여 순환비 $cl = Q_{cl(n+1)}/Q_{F(n+1)} = 2.5$ 가 되겠끔 제시한 Bond²⁾의 분쇄능 측정조건을 도입하면, Fig. 1에서 $Q_0 = Q_{F(n+1)} + Q_{cl(n+1)}$ 이므로, Eq.(7)은

$$\begin{aligned} R_{N(n+1)} &= \frac{Q_{cl(n+1)}}{Q_0} = \frac{Q_{cl(n+1)}}{Q_{F(n+1)} + Q_{cl(n+1)}} \\ &= \frac{2.5}{1 + 2.5} = 0.713 \end{aligned} \tag{9}$$

가 된다.

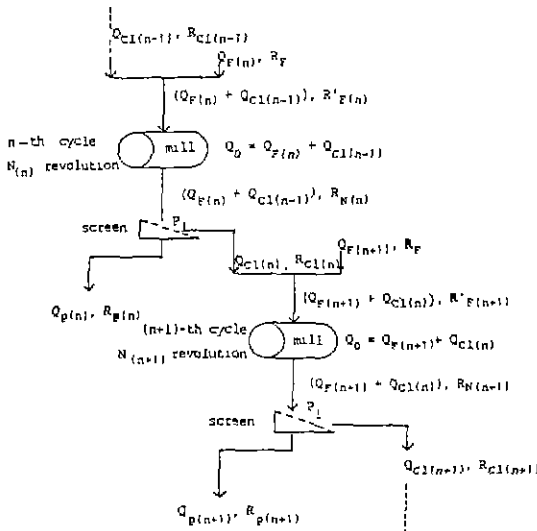


Fig. 1. Material balance of grinding operation.

Eq.(4) 에 $m = 1.2$ (경험치)³⁾ 및 Eq.(9) 의 관계를 적용하면, 다음식이 성립한다.

$$N_{(n+1)} = N_{(n)} \left[\frac{\log \{ 0.713 / R'_{F(n+1)} \}}{\log \{ R_{N(n)} / R'_{F(n)} \}} \right]^{\frac{1}{1.2}} \quad (10)$$

따라서, Eq. (10) 에 의하여 n 회째의 분쇄조작 결과로부터, $(n+1)$ 회째의 mill 안정 회전수를 계산할 수 있다.

2.2 분쇄 일지수(Work Index)의 測定^{4, 5)}
 분쇄 일지수 W_i 의 계산에는, Lewis의 일반식

$$\frac{dW}{dD_P} = -kD_P^{-n} \quad (11)$$

에 $n = 1.5$ 를 대입하여 입자경 D_P 에 관해서 적분한 다음식, 소위 Bond의 에너지 효율법칙을 이용하였다.

$$W = k_B \left(\frac{1}{\sqrt{D_{P_2}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{P_1}}} \right) \quad (12)$$

여기서 W 는 분쇄에 투입되는 일, k_B 는 Bond의 정수, D_{P_2} 는 분쇄 생성물의 입자경, D_{P_1} 은 분쇄시료의 입자경이다. Bond⁴⁾는 Eq.(12)에서, 무한대의 입자경을 100 μm 까지 분쇄하는데 필요한 일을 Work Index (분쇄 일지수)로 정의하였으므로, 분쇄 일지수 W_i 는 다음식으로 주어진다.

$$W_i = k_B \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) = \frac{k_B}{10} \quad (13)$$

Eq.(12)에서, 분쇄시료 및 분쇄 생성물의 80% 체통과 입자경을 각각 F_{80}, P_{80} 으로 표시하고, Eq.(12)에 Eq.(13)의 관계를 적용하면

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (14)$$

가 된다. 여기서, 일지수 W_i 값은 다음의 경험식^{5, 6)}으로 주어진다.

$$W_i = \frac{44.5}{(P_i)^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \times 1.10 \quad (15)$$

단 P_i 은 control sieve의 눈금이고, G_{bp} 는 분쇄능이다.

한편, Eq.(15)는 안지름 2440 mm의 습식 폐회로 일류형(overflow type) ball mill의 평균 분쇄 효율을 기준으로 한 것이므로, 다음의 경우 보정이 제안되고 있다.^{3, 5)}

$$\left. \begin{aligned} \text{건식 폐회로의 경우} : W_i \times \frac{4}{3} \\ \text{mill 지름 } D_m \text{ (mm)} : W_i \left(\frac{2440}{D_m} \right)^{0.20} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

따라서, 본 실험방법(건식 폐회로 분쇄) 및 사용 mill의 크기(133 mm ϕ)를 고려하면, Eq.(15)는 다음식과 같이 보정된다.

$$W_i = (1.10) \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{2440}{D_m} \right)^{-0.20} \cdot \left\{ \frac{44.5}{(P_i)^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \right\} \quad (17)$$

Eq.(17)을 이용하여, 코령토의 분쇄 일지수를 계산했다.

3. 實 驗

3.1 實驗裝置 및 器具類

분쇄기는 소형 ball mill (서독 Erweka 사제)을 이용하고, mill은 안지름 133 mm, 내부길이 144 mm의 alumina를 내장한 철제 pot를 사용하였다.

분쇄용 ball 재질은 alumina이며, ball 크기의 구성은 문헌 7)을 참조하여 작성한 Fig.2의 experimental line에 의거해서 10 mm ϕ 57개, 15 mm ϕ 68개, 20 mm ϕ 68개로 정했다. 각 크기에 따른 ball 개수의 총 중량은 2.0 kg이 된다.

분쇄시료는, 특히 입도분포 범위가 넓은 것을 사용하

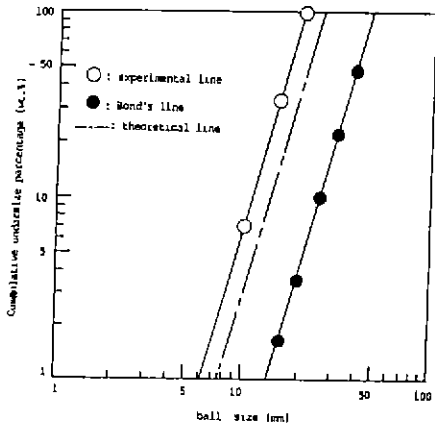


Fig. 2. Selection for the composition of ball size.

기 때문에, 원추 4 분법 등으로는 시료채취가 어렵고 여기서는 서독 Retsch 사제의 소형 2 분할기(10 mm slit)를 이용하여 시료채취하였다.

분쇄시료 및 분쇄 생성물의 입도분포 분석용 체는 서독 DIN 규격품(직경 200 mm, 길이 45 mm)인 53, 62, 74, 88, 105, 125, 149, 177, 210, 250, 297, 500, 710, 1000, 1400, 2000, 2800 μm 의 표준체를 사용하였다. 또한, 진탕기는 Vibration Sieve Shaker(서독 Retsch 사제)를 사용하였다.

3.2 實驗方法

3.2.1 粉碎試料의 調製 및 粒度測定

출발원료는 경남 산청지역에서 산출되고 있는 백색 저품위 고품토(SWC : Sancheong White C-grade)를 사용하였다. 분쇄시료의 조제는 3.1 절에서 언급한 분쇄능 측정용 mill 을 이용하여, 분쇄비가 작게 취해 지겟갈 粗粉碎한 후, 2800 μm 체로 체분리해서 그 통과분을 채집하고, 2800 μm 체 잔유분은 재분쇄하여 필요량이 얻어질 때까지 본 조작을 되풀이하였다. 이때 분쇄용 매체는 20 mm ϕ alumina ball 을 사용하였으며, 분쇄조건으로서 ball 충전량 40 vol. %, 시료 장입량 35 Vol. %를 선정했다. 한편, 시료의 분할은 2800 μm 체 통과분을 6.4 kg 정도 준비하고, Fig. 3에서 표시한 순서에 따라 시행하였다. 이 경우, 분할시료를 6.4 kg 취한 이유는, 분할비 관계상 편이를 도모하기 위함이다.

분쇄시료의 입도분포는, Fig. 3의 입도측정용 No. 1111과 No. 1112의 시료 50g씩 평량해서, 상술한 표준체를 組合하여 진탕기에서 5 분간 체분리하여 측정했다. 체망에 막히거나 부착한 입자는 소경의 brush로 말끔히 털어내고, 각 단의 총량과 처음 중량과의 차이가 2.0

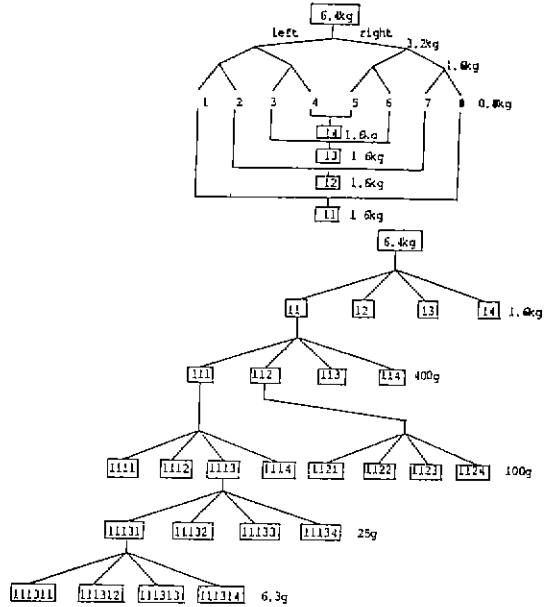


Fig. 3. Procedure for sampling.

Table 1. Particle Size Distribution of Feed and Grinding Product.

control sieve μm	feed		grinding product	
	weight of oversize (g)	cumulative oversize (%)	weight of oversize (g)	cumulative oversize (%)
2800	0			
2000	12.0	6.2		
1400	17.3	15.0		
1000	16.0	23.2		
710	20.8	33.9		
500	21.0	44.7		
297	30.5	60.3		
250	14.3	67.7		
210	21.0	78.5		
177	11.3	84.2		
149	20.1	94.6		
125	1.8	95.5		
105	0.4	95.7		
88	4.0	97.7	26.0	43.2
74	1.0	98.3	9.8	59.5
62	0.9	98.7	9.2	74.8
53	0.9	99.2	7.5	87.2
- 53	1.6		7.7	
- total	194.9		60.2	

g 이내로 되겠끔 주의를 요하였다. 체 잔유량을 각각 평량하여 입도분포를 계산하고, 그 결과를 Table 1 에 나타내었다.

3.2 測定操作

1 회째 분쇄에 있어서, 먼저 분쇄능 측정용 mill 에 소정의 ball 을 전부 충전한 후, 채취한 시료 700 cc (794 g) 를 장입하여 mill 을 100 회전시켰다. 이때 관성으로 말미암아 mill 이 약 1~2 회전 더 돌게 되었으나, 분쇄능 측정상 큰 영향이 없을 것으로 간주되어 그 값은 무시하였다. 100 회전이 끝난 다음 mill 내용물을 ball 분리용 체위에 옮겨담고, 여기서 mill 벽등에 달라붙어 있는 附着粉末은 brush 를 이용하여 잘 회수하였다. 이상에서 얻은 분쇄 생성물을 50 g 평량한 후 105 μm 체를 사용하여 진탕기에서 5분간 체분리하고, 순환량 Q_a 및 105 μm 체 통과분 Q_p 값을 결정하였다.

다음회의 mill 회전수 예측은, 105 μm 체 통과분의 증량에서 ball mill 1회전당 105 μm 체 통과분의 증량을 구하여, 石原⁹⁾가 경험적으로 제안한 근사식

$$N_{(n+1)} = N_{(n)} \left\{ \frac{Q_0/3.5 - Q_{P(n+1)}(1-R_F)}{Q_{P(n)} - Q_{P(n)}(1-R_F)} \right\} \quad (10)$$

에 의해서 산출하였다. 그러나, 회전수 예측계산 결과는 Eq.(10)의 속도식을 기초로 한 계산치와, Eq.(10)의 근사식을 이용한 계산치의 쌍방을 비교해서 나타내었지만, 실험은 前者에 의한 값에 따라 진행하기로 했다.

2 회째의 분쇄는, 상술한 채취시료(794 g)의 증량에서 순환량을 잠깐 값, 즉 $(Q_0 - Q_a)$ 값을 구한 후, 이 값의 무게만큼 새로운 시료를 추가해서, 1회째의 조작에 준하여 실시했다. 이상의 조작을, 순환비 Q_a/Q_p 값이 약 2.5에 접근하여 분쇄 생성량이 안정할 때까지 반복해서, 안정한 마지막 3회분의 G_{bp} (ball mill 1회전당 분쇄 생성량)의 평균치를 취하여 G_{bp} 값으로 정했다. 단, 마지막 3회분의 G_{bp} 최대치와 최소치의 차가 평균치의 3% 이내일 것이 요구되고 있으나⁹⁾, 이 점이 그렇게 간단하지 않고, 안정에 도달할 때까지는 상당한 시간이 소요되었다.

이상의 실험으로부터, 고령토의 분쇄 일지수 W_i 를 계산할 수 있으며, 그 상세는 고찰에서 기술하기로 한다.

4. 實驗結果 및 考察

3.2.1 절에서 언급한 분쇄시료의 입도분포 측정결과를, Semi-Log 그래프지에 plot 하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 ○ 표시는 105 μm 체 통과분의 측정

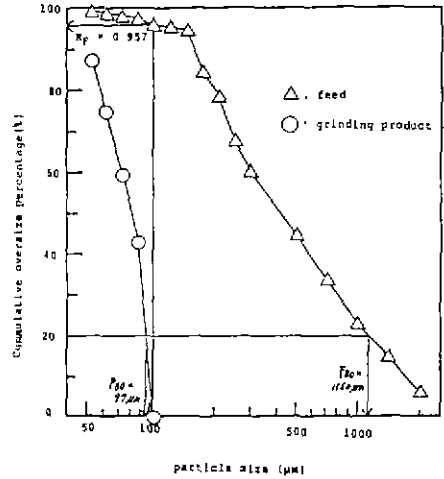


Fig. 4. Particle size distribution of feed and grinding product.

치이고, △표시는 2800 μm 체 통과분의 측정치이다. 누적 잔유율 50%에 해당하는 입자경 D_{P50} 을 구해 볼 것 같으면, 2800 μm 체 통과분은 420 μm, 105 μm 체 통과분은 82 μm 이 된다.

또한, Fig. 4를 이용하여 bond의 분쇄 일지수 W_i 를 계산하는데 필요한 F_{80} , P_{90} 및 R_F 값을 각각 결정했으며, 여기서 $F_{80} = 1160 \mu m$, $P_{90} = 97 \mu m$, $R_F = 95.7\%$ 임을 알 수 있다.

Eq.(10)에 의한 mill 안정 회전수의 예측 계산결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 3은, 보정식(17)에 의한 분쇄 일지수 W_i 의 계산결과 및 분쇄능 G_{bp} 의 측정서식을 나타낸 것이다. Table 3에서 볼 수 있는 것처럼, 본 실험 범위내에서 고령토의 분쇄 일지수 값은 8.7 kWh/ton으로 산출되었다. 한편, 고령토의 일지수를 구해 본 연구보고는 전혀 발표되어 있지 않아, 보다 실제적인 평가는 행하기 어렵지만, 고령토와 유사한 광종으로 생각되는 점토의 경우 $W_i \approx 7.0$ kWh/ton으로 계산되고 있다.¹⁰⁾ 일반적으로 점토광물은, 함수 균산암미늄을 주성분으로 하는 천연광석으로부터 공업적으로 정제한 백색 粉末狀의 상품을 칭하며, 그 주요 구성광물에 따라 Pyrophyllite질 점토, Kaolin질 점토, Halloysite질 점토, Celtecite질 점토등으로 구분되고 있다. 또한, 이들 물질의 분류척도로서 결정조직, 비중, 색상, Mohs 경도 등이 이용되고 있으나, 한편으로 SiO_2 와 Al_2O_3 의 조성비만을 前提하는 경우도 있다. 여기서, 결정조직 및 Mohs 경도는 분쇄능에 관계되는 인자로서, 특히 SiO_2 (Mohs' Hardness = 7.0)의 조성비가 각 점토물질의

Table 2. Calculation Sheet for Predicting Number of Mill Revolution ($Q_0=794$ g, $R_F=0.957$)

cycle number of grinding	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	number of revolution	$Q_D(n)$	$Q_{Cl}(n)$	$Q_F(n)$	$\frac{(3)}{Q_0}$	$(4) \times R_F$	$\frac{(6)}{Q_0}$	$(4)_{n+1} \times R_F$	$\frac{(8)+(3)}{Q_0}$
1	100	315	474	794	0.597	760	0.957	306	0.982
2	72	253	538	320	0.678		0.982	245	0.986
3	64	202	592	256	0.746		0.986	193	0.989
4	73	158	633	202	0.797		0.989	154	0.991
5	104	198	593	161	0.747		0.991	192	0.989
6	117	202	591	201	0.744		0.989	194	0.989
7	131	175	617	203	0.777		0.989	169	0.990
8	170	164	628	177	0.791		0.990	159	0.991
9	235	170	619	166	0.780		0.991	167	0.990
10	306	147	642	175	0.809		0.990	145	0.991
11	459	176	613	152	0.772		0.991	173	0.990
12	581	144	645	181	0.812		0.990	143	0.992
13	888	449	339	149	0.427		0.992	435	0.975
14	389	334	458	455	0.577		0.975	322	0.982
15	258	279	514	336	0.647		0.982	268	0.985
16	208	239	553	280	0.696		0.985	231	0.987
17	196	236	557	241	0.702		0.987	227	0.987
18	188	222	570	237	0.718		0.987	214	0.987
19				224					

cycle number of grinding	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	$\frac{(1)}{0.713}$ (9)	log (2)	$\frac{(3)}{(7)}$	log (3)	$\frac{(4)}{(3)}$	log (4)	$\frac{(5)}{1.2}$	real value of (6) $(i) \times (7)$
1	0.726	-0.139	0.624	-0.205	0.678	-0.169	-0.141	0.723
2	0.723	-0.141	0.690	-0.161	0.876	-0.057	-0.048	0.895
3	0.721	-0.142	0.757	-0.121	1.174	0.070	0.058	1.143
4	0.719	-0.143	0.806	-0.094	1.521	0.182	0.152	1.419
5	0.721	-0.142	0.754	-0.123	1.154	0.062	0.052	1.127
6	0.721	-0.142	0.752	-0.124	1.145	0.059	0.049	1.119
7	0.720	-0.143	0.786	-0.105	1.362	0.134	0.112	1.294
8	0.719	-0.143	0.799	-0.097	1.474	0.168	0.140	1.380
9	0.720	-0.143	0.787	-0.014	1.375	0.138	0.115	1.303
10	0.719	-0.143	0.817	-0.088	1.625	0.211	0.176	1.500
11	0.720	-0.143	0.779	-0.108	1.324	0.122	0.102	1.265
12	0.719	-0.143	0.820	-0.086	1.663	0.221	0.184	1.528
13	0.731	-0.136	0.430	-0.367	0.371	-0.431	-0.359	0.438
14	0.726	-0.139	0.592	-0.228	0.610	-0.215	-0.179	0.662
15	0.724	-0.140	0.659	-0.181	0.773	-0.112	-0.093	0.807
16	0.722	-0.141	0.707	-0.151	0.934	-0.030	-0.025	0.944
17	0.722	-0.141	0.711	-0.148	0.953	-0.021	-0.018	0.959
18	0.722	-0.141	0.727	-0.138	1.022	0.009	0.008	1.019

경도에 크게 기여할 것으로 생각된다. 즉, 경도가 큰 불질일수록 분쇄성은 저하되고, 미분화에 이르기까지 많은 일량이 필요하게 된다. 따라서, 분쇄 일지수의 두 측정결과를 상관하여 비교해 볼 때 절미치간에 근소한 차이가 인정되나, 문헌상에서 취급한 광물종류 및 그에 따른 주요 구성물질의 화학조성비 및 물성등을 감안해 보면, 원자등이 실측한 W_i 값은 비교적 신뢰할 수 있는 데이터로 사료된다.

또한 Table 3 에는, Eq. (10) 의 근사식과 속도식에 거인한 Eq. (10) 을 각각 이용하여 계산한 mill 안정회전

수의 예측결과를 비교해서 나타내었다. 兩者間에 다소의 차이가 인정되지만, 대체로 일치한 경향을 보이고 있어, 일지수 W_i 의 계산시 근사식을 사용해도 큰 지장이 없을 것으로 여겨진다. 그러나 전술한 바와 같이, 본 실험에서는 보다 엄밀한 계산법에 의거한 Eq. (10) 을 採用하여 실험결과를 정리했다.

Fig. 5 는, Table 3 의 분쇄조작 회수 n 에 따른 순환비 ci 및 분쇄능 G_{bp} 의 변화과정을 도시한 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 분쇄 생성량이 안정할 때 까지는 많은 분쇄시간이 소요되며, 또한 많은 시행착오

Table 3. The Measured Results of Work Index.

Sample : Sancheong kaolin
 weight of sample (700 cc) : $Q_0 = 794$ g
 P_1 control sieve : 105 μ m

cycle numbers of grinding n	number of revolution N	weigh of undersize of P_1 sieve (g) Q_P	weigh of oversize of P_1 sieve (g) Q_{ci}	weigh of additive feed (g) Q_F	weight of undersize of P_1 sieve before grinding (g) $Q_P(1-R_P)$	increased net weight of undersize of P_1 sieve after grinding (g) $Q_P - Q_P(1-R_P)$	net weight to be ground (g) $Q_0 - Q_P(1-R_P)$	predicted revolution numbers for next cycle		grmd-ability (g/rev.)
		approximation eqn. (18)	proposed eqn. (10)							
1	100	315	474	794	34	281	193	76	72	2 810
2	72	253	538	320	14	239	213	65	64	3 319
3	64	202	592	256	11	191	216	73	73	2 984
4	73	158	633	202	9	149	218	108	104	2 041
5	104	198	593	161	7	191	220	119	117	1 837
6	117	202	591	201	9	193	218	132	131	1 650
7	131	175	617	203	9	166	218	173	170	1 267
8	170	164	628	177	8	156	219	240	235	0 918
9	235	170	619	166	7	163	220	316	306	0 694
10	306	147	642	175	8	139	219	484	459	0 454
11	459	176	613	152	7	169	220	595	581	0 368
12	581	144	645	181	8	136	219	944	888	0 234
13	888	449	339	149	6	443	221	115	389	0 499
14	389	334	458	455	20	314	207	264	258	0 807
15	258	279	514	336	14	265	213	209	208	1 027
16	208	239	553	280	12	227	215	199	196	1 091
17	196	236	557	241	10	226	217	188	188	1 153
18	188	222	570	237	10	212	217	192	192	1 128
19	192	237	555	224	10	227	217			1 182

arithmetic mean of three cycles last-mentioned $\overline{G_{bp}} = 1.154$

$$\text{Work Index } W_i = (1.1) (3/4) (2440/D)^{0.20} \left(\frac{44.5}{(P_1)^{0.20} (G_{bp})^{0.42} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \right)$$

$$= 8.7 \text{ kwh/ton}$$

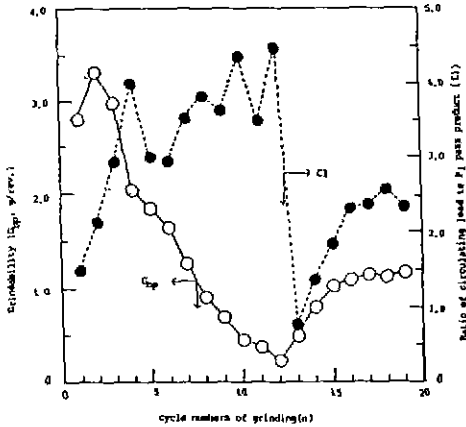


Fig. 5. Change of grindability and ratio of circulating load to P_1 pass product in grinding cycle

를 거쳐서 16회째 분쇄에 이르러 순환비 cl 는 2.4 에 접근하여, 비로소 G_{bp} 값이 일정 상태로 유지되고 있다. 이때 분쇄 생성량이 안정화된 마지막 3회분(17, 18, 19회) 분쇄능의 산술 평균치를 구하여, 3회분의 각 오차범위를 설정해 본 결과 ± 0.028 g/rev. 이내로서, 이 값은 Bond 가 제창한 ± 0.020 g/rev. 와 일치하고 있다. 한편, Bond의 분쇄능 측정용 mill(305 mm ϕ \times 305 mmL)에서는, 순환비 $cl = 2.5$ 의 안정 상태에 도달하는데 소요되는 조작회수가 약 10회 정도로서, 본 실험회수에 비하여 크게 단축되고 있으나, 본 실험에서는 전술한 소형 ball mill을 사용하였기에 이는 장치특성에 기인한 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터, 조분쇄를 대상으로 한 Kick의 이론($n = 1.0$)과, 미분쇄를 대상으로 한 Rittinger의 이론($n = 2.0$)을 조합한 Bond의 에너지 효율법칙은 광범위한 실험조건하에서 적용할 수 있음이 검증되었고, 또한 특정장치가 아닌 실험실적 ball mill을 이용하여 분쇄 일지수 값을 精度 좋게 구할 수 있는 방법을 확립했다.

5. 결론

본 연구는 batch식 ball mill에 의한 반폐회로 분쇄이고, 완전한 폐회로 분쇄는 아니다. 그러나 실험조건의 調整上에서는 본 분쇄방식이 효과적이며, 그 결론으로부터 폐회로 분쇄 일반에 대한 지침을 얻는데는 충분할 것으로 기대된다. 종래에 소형 ball mill을 이용하여, 분쇄 일지수를 구하는 방법에 관해서는 전혀 확립되어 있지 않으므로, 본 연구가 방법론적으로 얼마간의 기여를 할 수 있으면 다행으로 생각한다.

본 연구를 수행한 결과 얻게 된 총괄지견을 요약하면 다음과 같다.

1) 특정한 규격 mill이 아닌 실험실적 ball mill을 이용하여, 분쇄 일지수를 정도 좋게 추산할 수 있는 방법을 확립했다.

2) Bond의 ball mill 분쇄능 측정시, 안정 회전수를 구하는 조작은 Eq.(10)에 의하여 계통적으로 행할 수 있다.

3) 고령토의 분쇄 일지수는, 순환비 및 분쇄능 실험 결과의 신뢰도를 고려해 볼 때 약 9.0 kWh/ton으로 추정된다.

Nomenclature

- b : a constant related to number of the mill revolution [r.p.m.]
- b_1 : a constant related to grinding time in Eq. (1) [S]
- cl : circulation ratio, Q_{cl}/Q_p [-]
- D_{P_1} : Particle size of feed [μ m]
- D_{P_2} : particle size of grinding product [μ m]
- $D_{P_{50}}$: mean size of particle [μ m]
- F_{80} : size of a sieve aperture permitting the passage of 80% of feed [μ m]
- G_{bp} : grindability [kg/rev.]
- k : a constant related to particle size in Eq. (11) [μ m]
- k_B : a constant referred Bond's Law [μ m]
- m : a constant related to grindability [-]
- $N_{(n)}$: total number of the mill revolution at n - th cycle [r.p.m.]
- n : a constant in Eq. (11) [-]
- P_1 : opening of control sieve (105 μ m sieve) [μ m]
- P_{80} : size of a sieve aperture permitting the passage of 80% of P_1 pass product [μ m]
- Q_{cl} : weight of the circulating load [kg]
- Q_F : weight of additive feed [kg]
- Q_0 : weight of a mill charge [kg]
- Q_p : weight of undersize of P_1 sieve [kg]
- $Q_{p(n)}$: the value of Q_p in grinding product at n - th cycle [kg]

R_F : ratio of cumulative oversize of P_1 sieve to feed [-]
 $R'_{F(n)}$: the value of R_F at n - th cycle [-]
 $R_{N(n)}$: ratio of oversize of P_1 sieve to grinding product at n - th cycle [-]
 $R_{p(n)}$: ratio of oversize of P_1 sieve of $Q_{p(n)}$ to $Q_{p(n)}$ at n - th cycle [-]
 R_t : cumulative oversize percentage at time t [%]
t : grinding time [s]
W : work input [kWh/t]
 W_i : Bond's Work Index [kWh/t]

2) F. C. Bond: "The third theory of comminution," Trans. AIME, **193**, 484 (1952).
 3) JIS M4002 - 1976
 4) 井伊谷鋼一, 三輪茂雄編: "化學工學通論 II", 朝倉書店(1969).
 5) 粉體工學會編: "粉體工學便覽", 日刊工業新聞社(1986).
 6) 久保輝一郎, 神保元二, 水渡英二, 高橋浩, 早川宗一郎編: "粉體—理論と應用(改訂2版)", 丸善(1979).
 7) F. C. Bond: "Grinding ball size selection", Min. Eng., **10**, 592 (1958).
 8) 粉體工學研究會編: "粉體粒度測定法", 養賢堂(1965).
 9) 石原透: "現場における粉碎能の測定と應用", 日本鐵業會誌, **81**, 3, 13 (1964).
 10) 化學工學協會編: "化學工學便覽(改訂3版)", 丸善(1968).

Reference

1) 三輪茂雄: "閉回路粉碎過程의 實驗的 研究", 化學工學, **29**, 113 (1965).