

# 예비분쇄에 의한 시멘트밀 조업최적화방안 연구

방성호\* · 이형두 · 김기범 · 박문철 · 홍창식

( 동양시멘트(주) 중앙연구소 공정연구실 )

## 1. 서 론

국내의 시멘트 업계에서는 전력원단위 절감 및 생산량 증대를 기하고자 시멘트 분쇄에 예비분쇄시스템을 적극 도입·활용하고 있다. 예비분쇄시스템이 부설된 시멘트밀은 조업경험의 부족 및 조업환경의 변화로 조업특성 파악이 미비한 실정이며, 분쇄조업의 정량화 및 최적화가 요구되고 있다. 본 연구는 공정상의 문제점을 파악, 해결하고 조업특성을 해석하여 최적의 생산성 및 품질을 확보할 수 있는 최적의 조업조건 및 순환율을 도출함으로써 안정조업 및 품질향상을 기하고자 한다. 또한 특정 공정의 조업최적화 결과를 모델로 하여 공정 최적화가 요구되는 모든 공정에 이용 가능하도록 공정최적화 절차를 표준화하고자 한다.

본 연구는 Fig. 1에서 보인 combi-grinding type의 POLYCOM 예비분쇄시스템이 부설된 시멘트밀

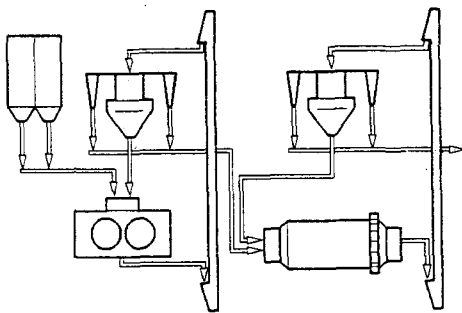


Fig. 1. Pregrinding system of combi-grinding type.

을 대상으로 하였다. 조업변수들이 조업특성에 미치는 영향을 정량적으로 도출하여, POLYCOM 측에서 분말도 향상 및 전력원단위 절감을 위한 조업개선 방안을 마련하고, Mill 측에서 안정 조업 및 최적의 품질을 확보할 수 있는 조업조건을 제시하고자 하였다.

## 2. 최적화 실험

공정실험은 라이나 교체로 공정이 가장 안정 조업되고있는 시멘트밀을 대상으로 하였고 ('94. 10. 20~'94. 11. 30), POLYCOM 측과 Mill 측에서 각각 실시하였다. POLYCOM측 공정실험에서는 주요 조업변수들 중에서 Initial roll gap(15~25 mm)과 Separator speed(260~380 rpm)를 독립변수로 제어하였고 생산량, Circulation fan damper, 초기 roll 압력을 일정하게 고정하였다. 주요 종속변수로 POLYCOM 정분의 분말도(Blaine), 전력원단위를 측정하였다. 실험은 3'×5' 요인배치법에 의해 15회를 실시하였다. Mill 측 공정실험에서는 주요 조업변수들중에서 DEG첨가량, separator speed, circulation fan damper, POLYCOM정분 Blaine을 독립변수로 제어하였고, 생산량, B/F fan damper, 밀내 강구배열 및 격막조건을 일정하게 고정하였다.

주요 종속변수로 정분의 분말도(Blaine, 44 $\mu$ mR, 88 $\mu$ mR, N, X<sub>0</sub>), 전력원단위, 밀출분 및 조분의 입도, 순환율, 분급효율을 측정하였다. 독립변수로 사용된 POLYCOM 정분 Blaine을 목표치로 만들기 위하여 POLYCOM 측 공정실험 결과를 이용하여



Table 2. Regression equations by response surface analysis.

POLYCOM 측			Mill 측											
회귀 계수 $\beta$	POLYCOM 정분 분말도 Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	전력원 단위 (kwh/t)	회귀 계수 $\beta$	시멘트 분말도					전력원 단위 (kwh/t)	밀 체류량 (ton/h)	B/E 전력 [amp]	순환율 CL (%)	분급 효율	
				Blaine <sub>e</sub> (cm <sup>2</sup> /g)	44 $\mu$ mR (%)	88 $\mu$ mR (%)	N (-)	X <sub>o</sub> ( $\mu$ m)					$\lambda$ (-)	d <sub>50</sub> ( $\mu$ m)
$\beta_0$	1578.5	7.79	$\beta_0$	3421.1	10.26	1.29	0.921	20.91	17.63	490.5	101.6	129.9	1.74	29.3
$\beta_1$	66.5	0	$\beta_1$	0	0.42	0.09	-0.009	0	-0.09	-18.5	-3.8	-14.0	0	3.4
$\beta_2$	133.6	0.46	$\beta_2$	210.3	-4.54	-1.09	0.025	-2.12	-0.20	119.8	24.7	63.3	0.33	-9.7
$\beta_{11}$	0	0.54	$\beta_3$	-54.0	1.05	0.23	0.000	0.50	0	-30.4	-6.7	-15.3	-0.05	1.9
$\beta_{12}$	62.7	-0.16	$\beta_4$	113.2	-0.47	-0.16	-0.021	-0.55	0	0	0	0	-0.05	0
$\beta_{22}$	-97.0	-0.30	$\beta_{11}$	100.0	0	0	0	0	0.16	0	0	0	0	0
			$\beta_{12}$	93.9	0	0	0	-0.49	0	27.6	0	12.6	0	-4.4
			$\beta_{13}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			$\beta_{14}$	0	0	0	0	0	0.15	0	0	0	0.12	0
			$\beta_{22}$	-90.2	1.42	0.60	0.028	0	0	0	0	0	0	7.1
			$\beta_{23}$	0	-0.61	-0.23	0.024	0	0.19	0	-4.0	0	0	0
			$\beta_{24}$	0	0	0	0	0	-0.27	0	0	0	0	0
			$\beta_{33}$	0	0	0	-0.020	0	0	0	0	0	0	0
			$\beta_{34}$	0	0	0	0	0	0.40	0	-8.0	0	0	3.6
			$\beta_{44}$	0	0	0	0	0	-0.46	33.8	9.5	19.2	-0.14	-5.8
표준편차 R <sup>2</sup>	±70.2 0.839	±0.23 0.864	표준편차 R <sup>2</sup>	±107.7 0.667	±0.43 0.980	±0.10 0.982	±0.023 0.576	±0.55 0.850	±0.17 0.660	±25.2 0.909	±4.18 0.942	±13.2 0.911	±0.11 0.828	±2.37 0.914

주) 회귀 모델식

1) POLYCOM 측:  $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{22} X_2^2$   
 여기서, X<sub>1</sub> = initial roll gap, X<sub>2</sub> = separator speed 로서 -1 에서 +1 로 선형변환된 값.

2) Mill 측: 여기서, X<sub>1</sub> = DEG addition, X<sub>2</sub> = separator speed, X<sub>3</sub> = circulation fan damper, X<sub>4</sub> = Blaine of POLYCOM fine 으로서 -1 에서 +1 로 선형변환된 값.

업될 때 separator speed를 262에서 380rpm으로 증가시키면 1,350에서 1,620cm<sup>2</sup>/g으로 증가하였다. Initial roll gap은 separator speed에 따라 POLYCOM 정분 Blaine에 미치는 효과에 차이를 보였다. Separator speed 를 최저치인 262 rpm으로 일정하게 유지시키고 initial roll gap을 15에서 25mm 로 변화를 주면 POLYCOM 정분 Blaine에 변화가 없었다. Separator speed를 증가시키면 따라 initial roll gap이 POLYCOM 정분 Blaine에 미치는 영향 정도는 증가하였고, initial roll gap이 클수록 POLYCOM 정분 Blaine이 증가하였다. Separator speed를 조업 최고치인 380rpm으로 유지시킬 때 Initial roll gap이 15에서 25mm로 변화

하면 POLYCOM 정분 Blaine은 1,480에서 1,750cm<sup>2</sup>/g 으로 증가하였다. 원료투입량(생산량)이 일정한 상태에서 separator speed 를 조업 최고치까지 증가시키면 조분량이 증가하게 되어 POLYCOM 입분량 또한 동시에 증가한다. 이때 Initial roll gap 이 작으면 POLYCOM 분쇄성능에 한계를 넘어서게 되어 분쇄가 원활하게 일어나지 않는다. 따라서 POLYCOM 입분량이 과다할 경우 최적의 분쇄효율을 유지하도록 gap 크기를 크게 함으로써 POLYCOM 정분 Blaine 을 높게 유지할 수 있다. 그러나 Separator speed가 낮아 조분량 즉 POLYCOM 입분량이 적을 경우 분쇄성능에 문제가 없기 때문에 POLYCOM 정분 Blaine은 gap 크기에 영향을 받지 않는다.

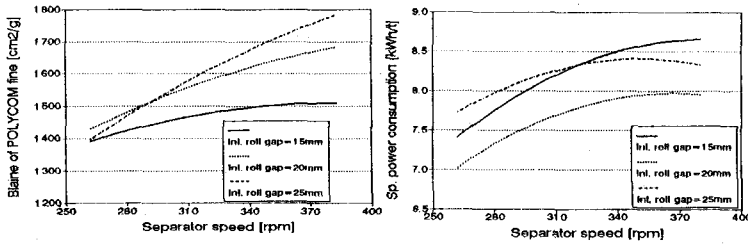


Fig. 2. The effect of separator speed and initial roll gap on Blaine of POLYCOM fine.

Fig. 3. The effect of separator speed and initial roll gap on specific power consumption.

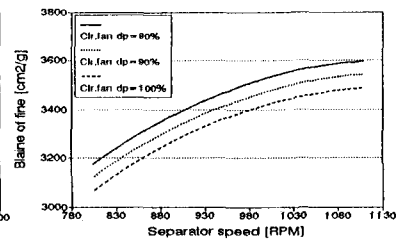


Fig. 4. The effect of separator speed and circulation fan damper on Blaine of fine.

따라서 POLYCOM 정분 Blaine을 높이고자 한다면 separator speed를 증가시키고 이와 동시에 initial roll gap을 증가시키는 방향으로 조업하는 것이 바람직하다.

### 3.1.2 전력원단위

POLYCOM 공정의 전력원단위는 Fig. 3에 나타난 것처럼 Initial roll gap과 Separator speed에 민감한 영향을 보였다. Separator speed는 Initial roll gap에 상관없이 전력원단위에 선형적 증가효과를 주었다. Initial roll gap을 정상조업치인 20mm로 유지하고 Separator speed를 262에서 380rpm으로 변화하면 전력원단위는 7.0에서 8.0kwh/t로 증가하였다. Initial roll gap은 전력원단위를 최소로 하는 최적점이 존재하였다. Separator speed를 중간 조업치인 321rpm으로 유지하고 Initial roll gap을 15에서 25mm로 변화시킬 때 정상조업치인 20mm에서 전력원단위는 최소를 나타내었고, gap 크기를 20mm에서 15mm로 낮추든지 25mm로 높일 때 전력원단위는 각각 1.1kwh/t 만큼 증가하였다. 또한 separator speed를 최고치(380rpm)로 유지하여 POLYCOM 입분량이 과다할 때 최적의 Initial roll gap은 21mm였고, Separator speed를 최소치(262rpm)로 유지하여 POLYCOM 입분량이 작을 때 최적의 Initial roll gap은 19mm였다. 그러나 Initial roll gap이 19~21mm라는 것은 공정조업 측면에서 큰 차이가 없고, gap 크기 조정으로 조업이 중단되는 과급 효과는 전력원단위를 저하시켜 얻을 수 있는 효과에 비해 훨씬 비경제적이다. 따라서 전력원단위를 최소화하기 위해서는 Separator speed를

가능한 한 낮추고 Initial roll gap을 20mm에서 조업해야 한다.

## 3.2 Mill측 실험 결과

### 3.2.1 시멘트 분말도

Mill 측 실험에서 시멘트의 Blaine은 네개의 조업변수 모두에 영향을 받았다. 특히 Separator speed는 Blaine에 큰 영향을 주어 Fig. 4에서 처럼 804에서 1,109rpm으로 증가하면 약 420cm<sup>2</sup>/g 정도 Blaine을 증가시켰다. DEG 첨가량과 Circulation fan damper는 시멘트 Blaine에 미치는 영향 정도가 크지 않았고, POLYCOM 정분 Blaine은 1,385에서 1,745cm<sup>2</sup>/g로 증가할 때 약 220cm<sup>2</sup>/g정도 Blaine을 증가시켰다. 따라서 시멘트의 Blaine은 Separator speed에 의해서 직접적으로 제어될 수 있고, POLYCOM 정분 Blaine에 의해서도 제어 가능함을 알 수 있다.

44, 88 $\mu$ m 잔사량은 조업변수들과의 상관관계에서 결정력이 0.95이상으로 높은 신뢰성을 주었으며, Fig. 5에서 처럼 separator speed와 circulation fan damper에 큰 영향을 받았다. DEG첨가량과 POLYCOM정분 Blaine은 44, 88 $\mu$ m잔사량에 영향을 주지 않았다. Separator speed를 804에서 1,109rpm으로 증가시키면 44 $\mu$ m잔사량은 9.0%정도 감소하였다. Circulation fan damper를 80에서 100%로 증가시키면 44 $\mu$ m잔사량은 2.3%정도 감소하였다. 따라서 44, 88 $\mu$ m잔사량의 제어 인자는 separator speed와 circulation fan damper임을 알 수 있다.

시멘트 입도분포는 Rosin-Rammler 식의 균일계수 N과 대표입경 X<sub>0</sub>로 표현할 수 있다. 균일계수 N

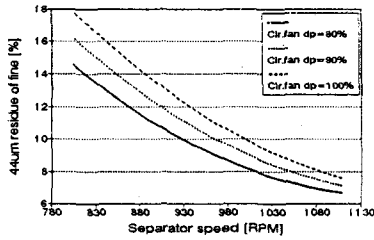


Fig. 5. The effect of separator speed and circulation fan damper on 44µm residue of fine.

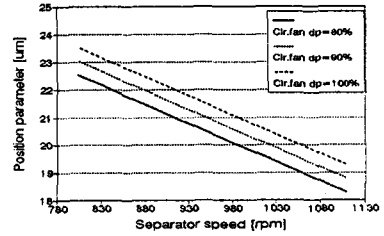


Fig. 6. The effect of separator speed and circulation fan damper on position parameter (Xo).

은 조업변수들과의 상관관계에서 결정력이 0.576으로 신뢰성이 낮아서 조업변수들에 의한 제어가 불확실함을 알 수 있다. 대표입경 Xo는 DEG 첨가량에 변화가 없었고, POLYCOM 정분 Blaine 이 증가할 때 미약한 감소효과를 보였다. 대표입경 Xo는 Fig. 6에서 처럼 Separator speed에 큰 영향을 받았으며, Separator speed를 804에서 1,109rpm 증가시키면 Xo는 4.2µm 정도 감소하였다. Circulation fan damper는 Xo에 큰 영향을 주지 못하였고, 80에서 100 %로 증가할 때 Xo는 1.0µm 정도 증가하였다.

따라서 시멘트 분말도는 Separator speed에 의해 직접적인 제어가 가능하며, 분말도 항목에 따라 DEG 첨가량, Circulation fan damper, POLYCOM 정분 Blaine을 부수적으로 조절할 때 최적의 분말도를 얻을 수 있다.

### 3.2.2 전력원단위

전력원단위에 미치는 각 인자들의 효과는 상호간에 교호작용이 심하게 발생하였다. 따라서 특정 조업변수에 대한 전력원단위의 변화를 직접적으로 설명하기 곤란하며, 전력원단위의 제어는 네가지 조업변수를 동시에 고려해야 한다.

## 4. 결 론

### 1) POLYCOM 조업 개선 방안

효율적인 공정조업을 위해서 접근할 수 있는 방법은 접근 관점에 따라 조업 조건이 다르다. 분말도 관점과 전력원단위 관점으로 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 본 실험결과에서 생산량이 200ton/hr로 일정할 때 서로 상반된 효과를 보였다. 분말도 관점에서 POLYCOM 정분 Blaine을 높일 수 있는 최적의 조업 조건은 Separator speed를 증가시키고 이와 동시에 Initial roll gap을 증가시키는 것이다. 전력원단위 관점에서 최적의 조업조건은 Separator speed를 낮추고 Initial roll gap을 20mm에서 조업하는 것이다.

### 2) mill 조업인자의 효과

조업변수들은 시멘트의 분말도와 조업특성에 긴밀한 관계를 보였으며, 조업변수들의 효과를 Table 3에 나타내었다. Separator speed는 시멘트 분말도와 순환율에 큰 영향을 주어 품질제어와 공정 안정화에 주 제어인자로 작용하였다. Circulation fan damper와 POLYCOM 정분 Blaine은 separator speed에 비해 제어효과가 크지 않았지만 보조 제어 인자로서 총

Table 3. Effect of each factors on operating characteristics at mill side.

인자	종속변수	시멘트 분말도					전력 원단위	밀 체류량	B/E 전력	순환율 C.L	보급효율	
		Blaine	44µmR	88µmR	N	Xo					λ	d50
DEC첨가량		○	—	—	○	—	○	○	○	○	○	⊙
Separator speed		●	●	●	⊙	●	○	●	●	●	⊙	●
Circulation fan damper		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
POLYCOM 정분 Blaine		⊙	—	—	⊙	⊙	○	○	○	○	○	○

주) ●:strong effect, ⊙:medium effect, ○:small effect, —:no effect

Table 4. Optimum operating conditions for desired fineness and constraints.

요구 분말도		Blaine > 3,300 cm <sup>2</sup> /g, 44 $\mu$ m < 8.0%, 88 $\mu$ m < 1.0%			
제약 조건		전력원단위 < 17.7 kwh/t, B/E 전력 < 115 amp			
조업 변수		DEG addigion [cc/t-cem]	Separator speed [rpm]	Circulation fan damper [%]	Blaine of Polycor fine [cm <sup>2</sup> /g]
실험구간	하한치	144	804	804	1,385
	상한치	270	1,109	100	1,745
최적 조업조건		144~270	1,048~1,109	88~100	1,529~1,745

분하였다. 특히 Separator speed가 높을때 B/E의 부하가 증가하여 밀 차단이 원인이 되면 Circulation fan damper를 증가시켜 B/E의 부하를 줄일 수 있다. DEG는 B/E의 부하를 줄였지만 분진 비산의 문제점이 발생하였다.

### 3) Mill 최적 조업조건 도출

Mill측 실험 결과에서 얻어진 회귀식으로부터 특정 분말도의 시멘트를 생산할 수 있는 최적의 조업조건을 도출하였다. 분말도는 Blaine을 3,300cm<sup>2</sup>/g 이상, 44 $\mu$ m 잔사량을 8.0%이하, 88 $\mu$ m 잔사량을 1.0%이하로 요구하였고, 제약조건으로 전력원단위를 17.7kwh/t이하로, 조업 차단의 원인이 되는 B/E 전력을 115 amp 이하로 유지하도록 하였다. 이때 최적의 조업조건을 Table 4에 나타내었고, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- DEG 첨가량은 시멘트 분말도에 미치는 영향이 작아서 실험구간 내의 모든 값에서 가능함을 보였다. DEG 첨가량은 분진 비산 및 유동성에 미치는 영향이 커서 이러한 문제가 해결된다면 첨가량에 관계없이 조업에 지장이 없다.
- Separator speed는 조업변수들 중 분말도 및 B/E 전력에 가장 민감한 영향을 주었다. Separator speed는 실험구간 내에서 극히 일부 즉 1,048rpm이상의 높은 값에서 요구되는 분말도의 시멘트를 생산할 수 있었다. 그러나 separator speed를 최대로 증가시킬 때 밀입분량이 증가하여 B/E 전력의 제한치를 넘어설 위험이 있다. 이를 방지하기 위해 circulation fan damper를 가능한 크게 열어야 한다.
- Circulation fan damper는 separator speed에 비해 분말도에 미치는 영향이 작았고, 적게 열수록 분말도 증가에 기여하였다. 그러나 circulation fan

damper가 분말도에 미치는 효과는 분말도의 주 제어인자인 separator speed가 분말도에 미치는 영향에 비해 미미하다. 분말도 주 제어인자인 separator speed가 특정 분말도의 시멘트를 생산하기 위해 크게 증가함에 따라 B/E 전력이 제한치를 넘어서지 않도록 circulation fan damper도 88%이상으로 동시에 증가시켜야 한다. 이러한 circulation fan damper의 증가는 분말도 증가에 역행하지만 B/E 전력을 제한영역 내로 유지시키는 효과로 작용하고 있음을 나타낸다.

- POLYCOM 정분 Blaine은 시멘트 분말도 특히 Blaine에 영향을 주는 것으로 나타남에 따라 요구 분말도의 시멘트를 생산하기 위해서는 1,530cm<sup>2</sup>/g 이상 유지되어야 한다.

### (참 고 문 헌)

- 1) 이근성, 전귀, 이형두, 김기범 : "분쇄조업에 있어서 시멘트 품질 개선에 관한 연구", 研究報告集, 동양중앙연구소, 5, 5 (1992)
- 2) "Cement Seminar -Material Technology", Holderbank Management Service, 2, 16/1 (1986)
- 3) Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.-G. and Sprung, S: "Particle Size Distribution and Properties of Cement - Part I: Strength of Portland Cement", Zement-Kalk-Gips, 38, 4, 169 (1985)
- 4) Ellerbrock, H.-G., Sprung, S. and Kuhlmann, K.: "Particle Size Distribution and Properties of Cement - Part III: Influence of the Grinding Process", Zement-Kalk-Gips, 43, 1, 13 (1990)
- 5) 박성현 : "현대실험계획법", 대영사 (1982)