

분쇄조제에 의한 분쇄공정 효율 향상

이정범* · 이형두 · 손국준 · 전 귀 · 백 일 환

〈동양시멘트(주) 기술연구소〉

〈동양 북평공장〉

1. 서 론

시멘트 분쇄공정에서 분쇄기(tube-mill)의 분쇄효율은 약 1% 정도에 불과하며 개선 방안으로 분쇄매체 및 피분쇄물(클링커, 석고)외에 제 3의 물질(분쇄조제)을 가하여 분쇄성 향상을 도모하고 있다.

시멘트용 분쇄조제로서 사용되는 물질은 거의 제면활성제 계통의 것으로 1970년대까지는 글리콜류와 트리에탄올 아민 등이 사용되었으나 가격이 고가이기 때문에 최근에는 화학공장의 폐액이나 부산물을 이용한 리그닌계 및 아민계 복합물의 사용이 늘고있는 실정이다. 국내의 시멘트 업계에서 주로 사용하고 있는 분쇄조제로는 DEG와 HEA-2 등이다.

유럽 및 일본에서는 분쇄조제에 대한 많은 연구가 이루어져서 다수의 특허가 출원되었고 적용방법에 대한 연구 및 실험이 광범위하게 이루어졌다. 특히 미분의 응집에 대해서는 Beke¹⁾와 Papadakis²⁾, 적용 방법에는 Seebach³⁾, Tanaka⁴⁾, Mardulier⁵⁾ 및 Iwabuchi⁶⁾ 등이 크게 공헌하였다.

본 연구에서는 분쇄조제(DEG)의 사용량에 따른 조업환경의 변화에 대하여 밀 체류량, 밀 체류시간, 분급효율, 강구배열 등 주요 조업 변수를 제어하여 분쇄조제가 시멘트의 분말도, 전력원단위, 생산량, 원가절감 효과 등에 미치는 영향을 파악하고 분쇄조제의 최적 투입량을 결정하고자 하였다.

2. 분쇄조제의 작용

분쇄조제의 작용은 <Fig. 1>에 나타난 흡착 모델을 통해 설명될 수 있다. 분쇄조제는 분쇄매체(강구, 라이너)에 부착되는 코팅이나 미립자끼리의 결합에 의한 2차입자 생성 및 조립자가 부착되는 현상을 감소시켜 분쇄를 촉진시킨다. 특히 과분쇄시 증가된 미립자의 표면에너지에 의하여 응집이 심화되는데 이때 조제는 분말 표면에 흡착층을 만들어 표면에너지를 작게 함으로써 <Fig. 1 (a)> 미분의 응집 <Fig. 1 (b)> 과

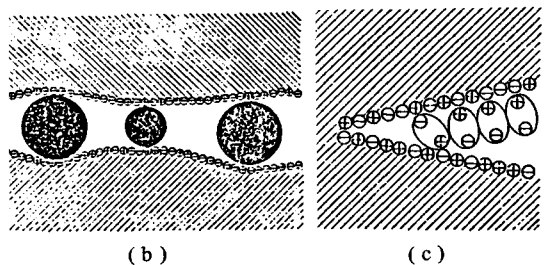
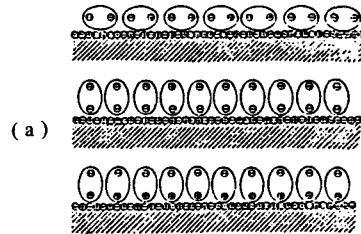


Fig. 1. Schematic diagram of adsorption model by grinding aids.

미소균열의 재결합을 억제하여 <Fig. 1 (c)>미소균열의 생성을 촉진시키는 작용을 한다.

Tanaka⁴⁾는 분쇄조제가 분말표면에 액화흡착되는 기구로 단분자층 흡착(Monolayer adsorption)을 가정하여 이론적 분쇄조제의 최적사용량을 식 (1)로 나타내었다.

$$C(\%) = \frac{100 \times M \times S_{av}}{N_A \times S} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 N_A 는 Avogadro 수를 나타내며 S_{av} 는 분말의 비표면적 (cm^2/g)을, S 는 분쇄조제의 분자표면적 (cm^2)을, 그리고 M 은 분쇄조제의 분자량을 나타낸다. 식 (1)은 여러 문헌에 소개되어 있는 공장실험 결과와도 어느 정도 일치함을 보여 주었다.

3. 실험

실험은 당사의 No. 1 Cement Mill에서 4개월(1989. 3. 1~6. 30)에 걸쳐 실시되었다. Fig. 2에 시멘트 밀의 공정도를 나타내었다.

독립변수로는 분쇄조제 (DEG) 투입량과 석고-A 첨가량을 설정하였고 운전조건은 조업환경의 변화에 따라 적절히 제어하였다. 공정실험에서 주요 관측대상은 시멘트의 분말도(88 μ m Residue, Blaine), 전력원단위와 생산량 등이었으

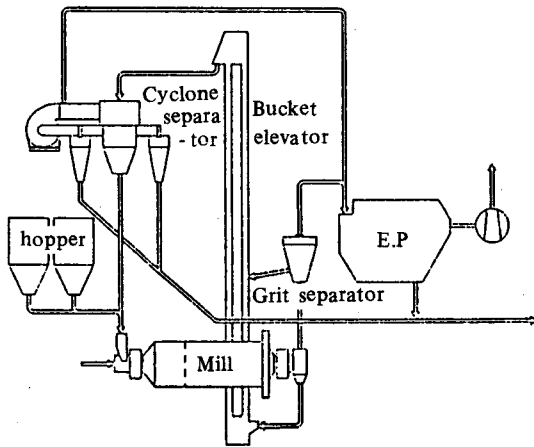


Fig. 2. Schematic flow diagram of cement grinding process.

며, 이들을 종속변수로 삼았다.

4. 실험 결과 및 고찰

실험 결과는 반응표면분석법(Response surface analysis method)에 의하여 해석하였으며 2차 회귀 모델을 적용하였다.” Fig. 3에 반응표면분석 프로그램의 흐름도를 나타내었다.

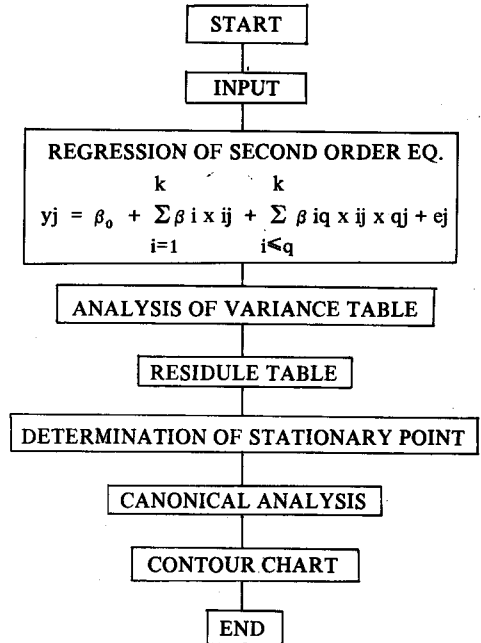


Fig. 3. Flow sheet of response surface analysis program.

4.1 피분쇄물의 분쇄성과 분쇄조제의 효과

Fig. 4와 Fig. 5는 조제효과가 석고-A (Work Index=15.7 kwh/t)의 첨가량에 크게 영향을 받으며 조제 투입량을 최대로 하면 시멘트의 분말도를 일정하게 유지시킬 때 전력원단위가 약 2~10kwh/t 절감되며 생산량은 8~36 t/h이 증가함을 보여준다.

따라서 석고-A의 첨가량에 크게 영향을 받는 것으로 보아 피분쇄물의 분쇄성(Grindability)에 조제의 효과가 민감함을 고찰할 수 있었다.

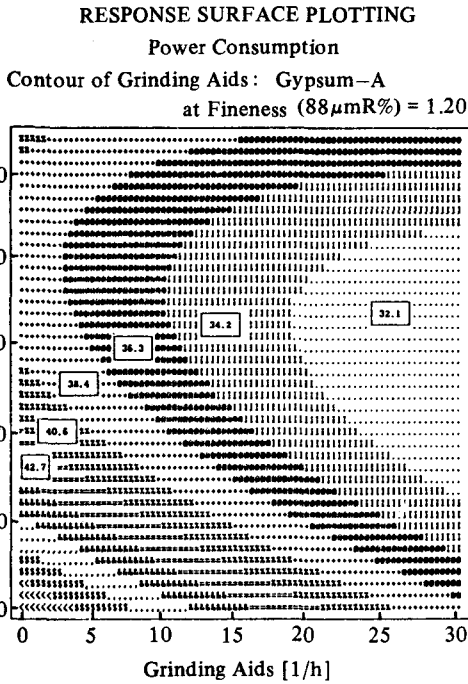


Fig. 4. Response surface of power consumption for DEG, gypsum-A and fineness.

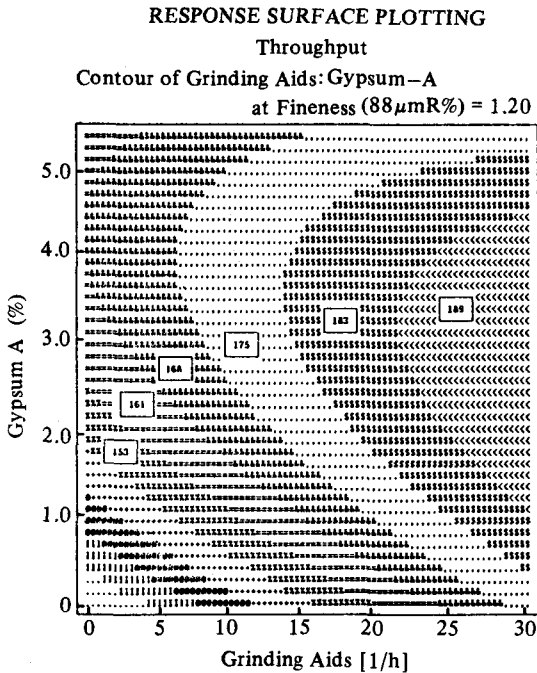


Fig. 5. Response surface of throughput for DEG, gypsum-A and fineness.

4.2 분쇄조제에 의한 생산성 향상

1) 시멘트 분말도에 미치는 영향
생산량을 일정하게 유지하면서 분쇄조제 투입량을 증가시켜 본 결과 시멘트의 분말도는 Fig. 6 과 같이 88 μ m Residue가 2.1에서 0.2(%)로 떨어지며 Blaine는 3,050에서 3,550 (cm²/g)으로 최대 500 (cm²/g)이 증가하였다.

Fig. 6의 결과를 토대로 분쇄조제 투입량과 시멘트 분말도와의 관계를 반응표면 분석을 이용, 2차 회귀모델로 추정하여 식 (2), (3)을 구하였다.

$$R = 2.06 + (11.2x - 2.44x^2) / 1,000 \dots (2)$$

$$B = 3,050 - 3.09x + 0.67x^2 \dots (3)$$

여기서 R은 시멘트의 88 μ m Residue(%)이고 B는 Blaine (cm²/g)이며, x는 분쇄조제 투입량 (ℓ/h)이다.

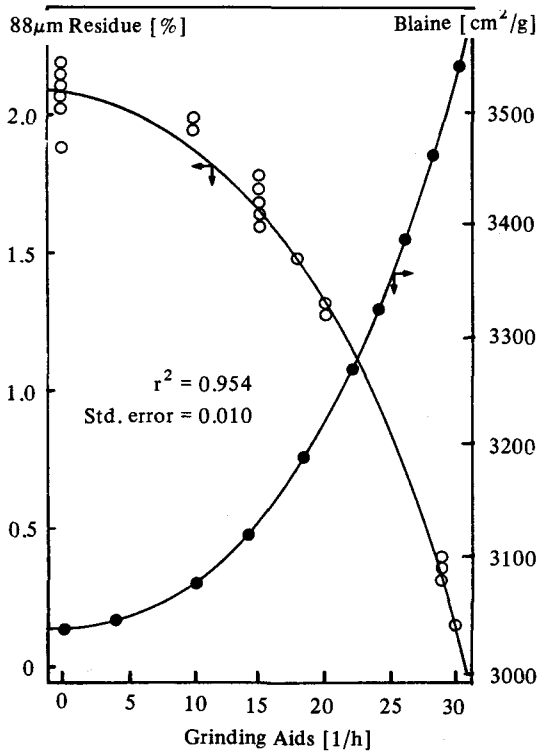


Fig. 6. The effect of DEG addition on fineness at constant throughput.

2) 전력원단위와 생산량에 미치는 영향

Fig. 7과 Fig. 8은 석고-A의 첨가량이 최대 일 때 조제 투입량과 전력원단위와의 관계(Fig. 7) 및 생산량과의 관계(Fig. 8)를 나타낸 것으로 조제 사용에 의해 전력원단위는 최대 3kwh/t이 절감되고 생산량은 약 15 t/h가 증가하였다.

Fig. 7, 8을 토대로 분쇄조제 투입량과 전력원 단위 및 생산량과의 관계를 반응 표면분석을 이용, 2차 회귀모델로 추정하여 식 (4), (5)를 도출하였다.

$$P_w = 39.9 - (237.7x - 4.5x^2) / 1,000 \dots (4)$$

$$P = 161.5 + (858x - 12x^2) / 1,000 \dots (5)$$

여기서 P_w 는 전력원단위(kwh/t)이고 P 는 시멘트 생산량(t/h)이며 x 는 분쇄조제 투입량(l/h)이다.

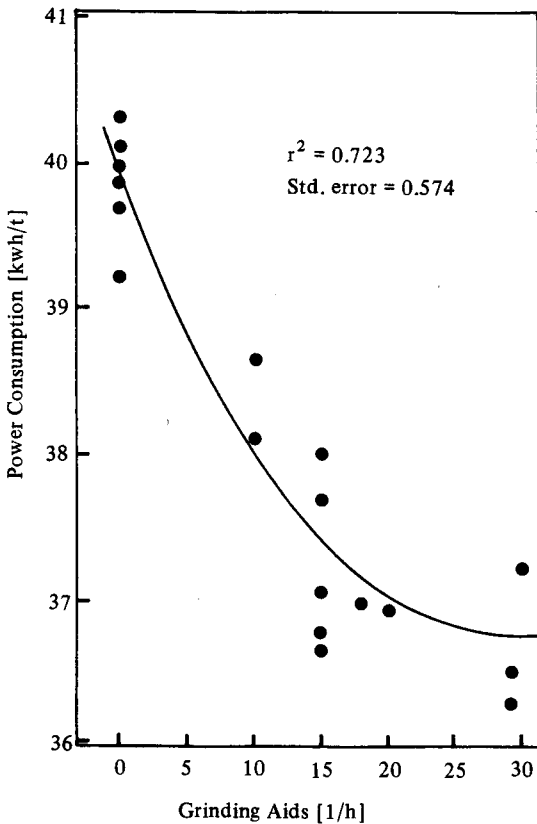


Fig. 7. The effect of DEG addition on power consumption at constant fineness.

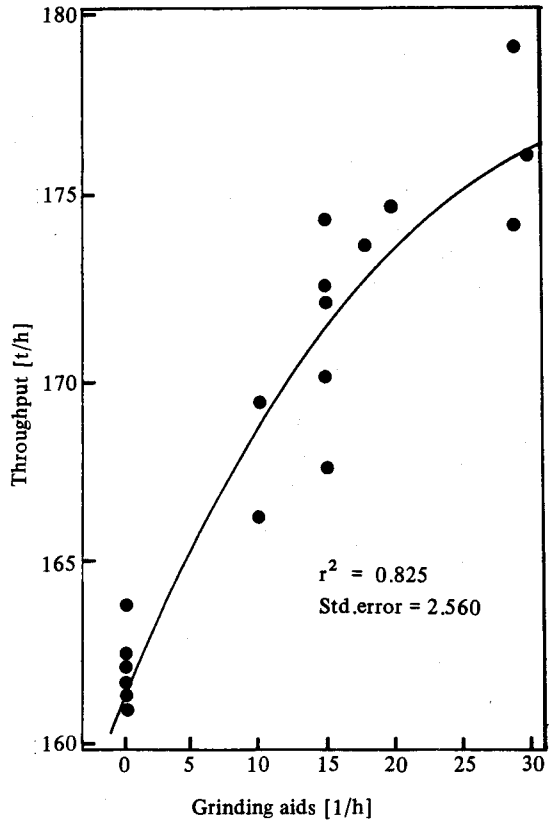


Fig. 8. The effect of DEG addition on throughput at constant fineness.

4.3 분쇄조제의 최적사용

분쇄조제로 사용되고 있는 DEG와 HEA-2는 400~800(원/Kg)으로 고가일 뿐만 아니라 가격 변동이 심하기 때문에 조제가격에 따른 최적사용량을 결정할 필요가 있다.

Fig. 9에 조제가격에 따라 시멘트 제조원가가 최소로 되는 조제 투입량, 즉 조제 가격에 따른 최적 투입량과 최적량을 투입했을 때의 원가 절감액을 나타내었고 Fig. 10에 조제가격에 따른 최적량 사용시 조제가격과 생산량 증가율 및 전력원단위를 나타내었다.

이로부터 조제가격이 200에서 1,000(원/Kg)까지 변동할 때 분쇄조제(DEG)의 최적 사용량은 약 100~180(g/t-cement)이며, 원가절감액은 50~180(원/t-cement)일 것으로 추정되었

다. 이때 전력원단위는 36.7~37.2(kwh/t-cement)에서 유지되고 생산량 증가율은 6.8~8.8(%)로 예상된다.

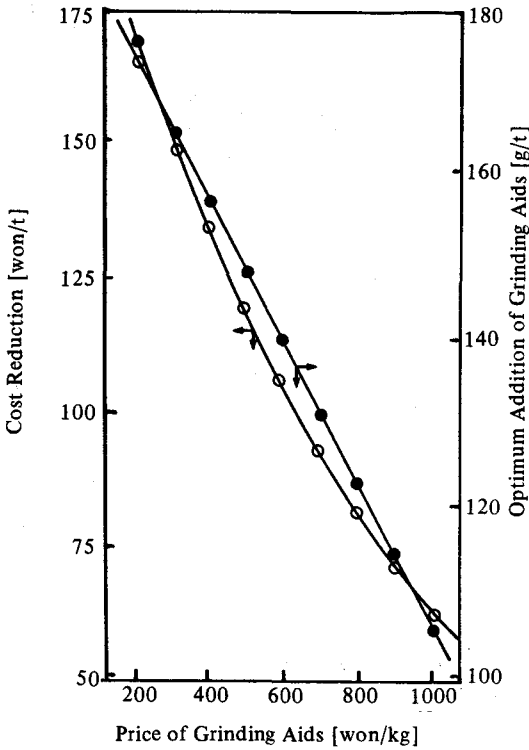


Fig. 9. The effect of DEG price on cost reduction and optimum addition.

5. 결 론

당사 No.1 Cement Mill에서의 공정 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 생산량이 일정할 때 시멘트의 분말도에 대한 조제의 효과는 아래의 두 식과 같다.

$$88\mu\text{mR}(\%) = 2.06 + (11.2x - 2.44x^2)/1,000$$

$$\text{Blaine}(\text{cm}^2/\text{g}) = 3,050 - 3.09x + 0.67x^2$$

2. 시멘트의 분말도가 일정할 때 전력원단위와 생산량에 대한 조제의 효과는 아래의 식들로 표현되었다.

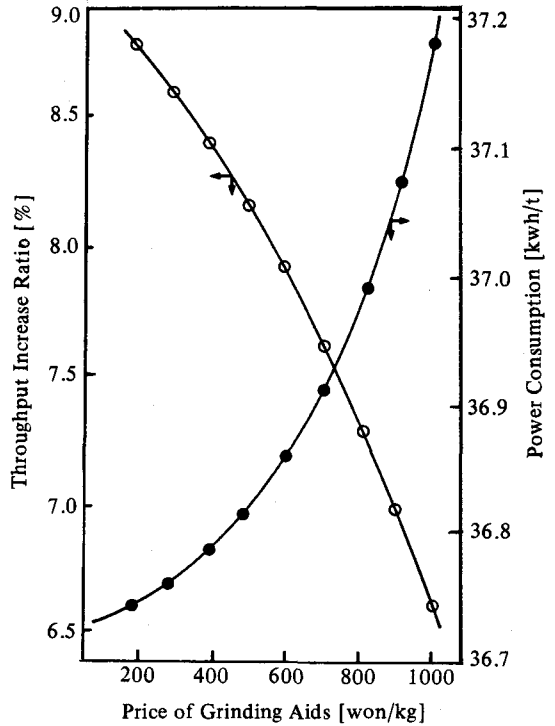


Fig. 10. The effect of DEG price on throughput and power consumption at optimum DEG addition.

$$P_w(\text{kwh/t}) = 39.9 - (237.7x - 4.5x^2)/1,000$$

$$P(\text{t/h}) = 161.503 + (858x - 12x^2)/1,000$$

따라서 당사의 No.1 Cement Mill의 경우, 분쇄조제의 사용량을 조제가격에 따라 100~180(g/t-cement)로 최적화하여 시멘트 톤당 50~180원의 제조원가를 절감하는데 성공하였다.

<참 고 문 헌>

1. B. Beke World Cem. Technol., 7(5), 165(1976).
2. M. Papadakis, Auf-Tech, 2(9), 353(1961).
3. H. M. Seebach, Zement-Kalk-Gips, 5, 202(1969)
4. T. Tanaka, 化學裝置, 6(8), 27(1964).
5. F. J. Mardulier, Rock Products, 70(5), 110(1967).
6. T. Iwabuchi, et al., セメント技術年報, 31, 90(1977).
7. 박성현, “현대실험계획법”, 대영사, 1986, p. 575.