

분쇄조업조건이 Cement 입도분포에 미치는 영향

박영수* · 이대호 · 송석규 이상웅 · 김영찬

〈 한라시멘트(주) 기술연구소 〉

〈 생산부 〉

I. 서론

시멘트 분말도는 현장에서 비표면적(Blaine)과 잔사율(90 μ m R, 44 μ m R)로 관리되고 있으나 Separator가 고효율로 바뀔때 따라 비표면적이 입자전체의 Fineness를 나타내지 못하고 잔사율이 비슷하여도 강도발현 영역(0-30 μ m)의 입자에서 차이가 발생되므로 본 연구에서는 시멘트업계에서 시멘트 정분에 대해 널리 사용되고 있는 ROSIN-RAMMLER-BENNET식의 매개변수인 균일 계수 n값과 위치상수 X_0 에 의해 당사 시멘트의 품질을 분석하였고 유사한 Clinker base에 분쇄조업에서 품질에 영향을 미치는 석고, Slag량을 고정시키고 조업 조절변수의 조절에 의한 공정시험을 통해 n값과 X_0 가 품질에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 원하는 입도분포의 시멘트를 생산하기위해 입도분포에 영향을 주는 인자들을 파악함과 동시에 각 인자들과 시멘트 입도분포와의 관계를 도출해냄으로써 분쇄조업에 있어서 높은 품질수준을 유지하는 방법을 제시하고자 하였다.

II. 실험

1. 당사 시멘트의 입도분포가 품질에 미치는 영향조사

시멘트의 품질은 원료, 제조 공정, 조업 특성에 따라 무수한 인자를 가지고 있다. 일반적으로 시멘트 품질관리의 대상항목은 각 재령에서의 압축강도, 주도,

응결, 안정도, 수화열 등이다. 이러한 시멘트의 품질에 영향을 주는 주요인자는 원료, 소성, 분쇄공정에서의 무수히 많은 인자들에 의해 결정되므로 이중 몇 개의 인자만을 가지고 회귀분석을 하였을 경우 낮은 상관성을 가질 수 밖에 없으나 경향파악의 측면에서 품질관리실 협조하에 물리시험 Data가 있는 당사 시멘트 191개의 Sample을 입도분석을 하여 ROSIN-RAMMLER-BENNET의 매개변수 n값과 X_0 가 시멘트 품질에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 분쇄조업이 입도분포에 미치는 영향 조사

입도분포가 시멘트 물성에 미치는 영향을 구체화시키기 위해 다른 조업조건의 영향을 최소화하여 공정시험을 실시하였다. 우선 소성공정에서의 영향을 최소화하기 위해 정상 운전상태의 Kiln에서 배출된 Clinker를 증설 Clinker silo #1에 저장하였고 SLAG투입량을 3%, 석고투입량을 4.8%로 고정하여 분쇄조업에 있어서도 입도분포이외의 영향인자를 최소화하였다. 공정 시험은 증설 Cement mill 2호에서 실시하였고 조업 조절변수로는 생산량(t/h), Separator rotor speed(%), Fan damper(%) 이었다.

각 조절 변수에 따라 최소의 실험수를 얻기위해 적교중심 합성 계획법에 의해 배치"하였다. 또한 분쇄조업조건이 입도분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 추가 공정시험을 실시하였고, 경향분석후 확인 및 보완 시험을 거치고 실험실적 실험도 병행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시멘트 입도분포와 품질 (현황 조사)

먼저 현장에서 공정 관리중인 Blaine, 44 μ m잔사(%)로서 시멘트 압축강도와와의 관계를 조사하였다.

Table 1 Blaine, 44 μ m잔사와 압축강도와와의 관계

압축강도	결정 계수 (R ²)	Parameter intercept	Blaine (cm ² /g)	44 μ m잔사
3일	0.492	243.2		-3.0095
	0.498	203.4	0.0135	-3.4841
7일	0.351	301.8		-2.7735
	0.360	250.3	0.0174	-3.3874
28일	0.414	377.3		-2.4197
	0.425	332.5	0.0152	-2.9545

이와 같이 현장에서 공정 관리중인 Blaine, 44 μ m 잔사가 낮은 결정력을 보이는 이유는

(1) 시멘트의 압축강도에 영향을 미치는 수많은 인자중 단지 분말도만으로 충분히 설명이 가능하지 않다는 것과

(2) 현장에서 관리중인 잔사량에 의한 항목은 시멘트 전 입도구간을 설명하기 미흡하며 Data의 신뢰성이 떨어진다는 사실.

즉 Blaine, 잔사량이 전 입도 구간을 설명하는 데는 부족한 점이 많다는 것이다.

후자의 가능성을 확인하기 위해 이론적 고찰에서 설명한 ROSIN-RAMMLER-BENNET의 입도분포 매개 변수(n, X₀)로서 시멘트 품질과의 관계를 조사하였다.

1) 주도

본 조사에서 확보한 191개의 Data에서 n값, X₀와 주도와의 관계를 Table 2에 나타내었다.

n값과 X₀가 주도에 미치는 결정력은 매우 우수하며(R²=0.912) 입도분포가 좁고 Fineness가 증가함에 따라 상승하는 경향을 뚜렷하게 보인다.

Sprung¹⁾ 등의 설명에 의하면 일정 Blaine에서도

Table 2 n값, X₀와 주도와의 관계

구 분	결정 계수 (R ²)	Parameter intercept	n	X ₀
주도	0.905	11.17	13.58	
	0.746	37.356		-0.5189
	0.912	17.159	10.82	-0.134

입도분포가 좁을수록 주도가 상승하는 원인은 다음과 같이 2가지 원인에 기인하는데,

(1) 입도분포가 좁아지고 fine해질수록 C₃A의 수화 전환율이 증가한다.

(2) 입도분포가 좁을수록 큰 공극을 갖는다. 따라서 물은 화학반응 이전에 그 공극을 채우려 하기 때문에 같은 비표면적이라 하더라도 입도분포가 좁을수록 많은 물을 요구하게 된다.

2) 압축강도

시멘트의 입자가 fine하면 시멘트는 빨리 경화한다. 입도 구간이 시멘트 압축강도에 미치는 영향에 대한 연구결과¹⁾⁵⁾ 0-3 μ m 구간은 높은 1일강도를 나타내고 3-25 μ m(or 3-30 μ m) 구간은 90일 강도에서 최고를 나타내는데 이 두 구간은 대략 28일강도에서 같아진다. Coarse fraction(25-50 μ m)은 28일 강도에서 최하이나 90일 강도에서는 0-3 μ m에서 얻어진 값이 거의 같아진다고 보고하고 있다. 그러므로 높은 28일 강도를 발현시키기 위해서는 3-25 μ m(or 3-30 μ m) 사이에 가능한한 입자 구성비가 많을수록, 즉 n값이 클수록 유리하다.

또한 같은 n값일때 Position parameter X₀의 영향을 받는다. 그 이유는 Ellerbrock¹⁾등은

1) Position parameter X₀는 입자의 약 2/3 (63.2%)가 그 이하라는 의미이고

2) Cement의 강도 발현은 0-30 μ m사이에서도 세분화된 입도구간의 영향을 받기 때문이라고 설명하고 있다.

다시 말하면 ROSIN-RAMMLER-BENNET의 입도 분포 매개 변수중 n값이 클수록 X₀가 적을수록 강도 발현에 유리하다는 것이다.

현장에서 공정 관리중인 Blaine, 44 μ m 잔사량의 결정계수 R²이 0.3, 0.4로 낮아서 품질제어인자로 평

Table 3 n, Xo와 Mortar 압축 강도와와의 관계

구 분	결정 계수 (R ²)	Parameter intercept	n	Xo
3일	0.761	6.1	203.0	
	0.612	395.6		-7.7020
	0.782	140.6	139.3	-2.9487
7일	0.621	94.4	175.8	
	0.464	409.9		-5.8390
	0.639	242.1	107.8	-3.2950
28일	0.660	217.9	130.3	
	0.657	485.6		-5.6692
	0.719	353.3	70.4	-3.1312

가하기 어려우나 ROSIN-RAMMLER-BENNETT의 입도 분포 매개 변수 n값, Xo를 이용하면 결정계수 R²이 0.7로 비교적 우수하여 입도 분포의 전구간을 정확히 표현할 뿐아니라 분쇄 조업에 있어서 품질 특성을 파악하는데에도 개선된 방법임이 확인되었다.

2. 시멘트 입도분포와 품질(공정실험)

상기 조사에서 나타난 바와 같이 ROSIN-RAMMLER-BENNETT식의 n값과 Xo가 시멘트 품질에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해 다른 영향 인자의 간섭을 최대한 줄이는 방향으로 실시되었다.

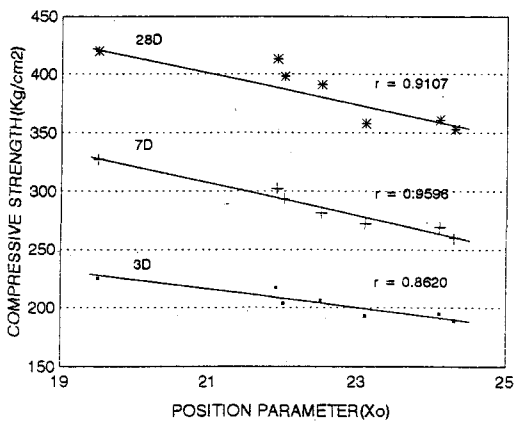


Fig. 1 위치상수와 Mortar 압축강도와의 관계

Clinker의 영향을 줄이기 위해 안정된 공정에서 생산된 Clinker를 증설 Clinker silo #1에 저장했고 분쇄 조업에서 시멘트 품질에 영향을 주는 인자인 Slag 량을 3%, 석고양은 4.8 %로 고정시켰다. 공정 실험은 증설 Cement mill 3호에서 실시하였고 시멘트 품질 특성을 해석하기 위해 주도, 용결시간, 압축 강도 (3일, 7일, 28일)를 분석하였다. 공정 실험 결과로 부터 시멘트 압축 강도에 미치는 위치상수 Xo의 영향을 Fig.1에 나타내었다.

이상에서 보는 바와 같이 강한 상관관계를 보여 ROSIN-RAMMLER-BENNETT의 매개 변수 n값과 Xo가 시멘트 품질을 설명하는데도 적합한 것으로 나타났다.

3. 분쇄조업 조건이 시멘트 입도분포에 미치는 영향

지금까지는 시멘트 품질에 미치는 입도분포의 영향을 기술하였는데 어떻게 하면 원하는 입도의 시멘트를 제조할 것인가가 중요시된다. 원하는 입도의 시멘트를 제조하기 위해서는 우선 시멘트 입도에 영향을 주는 인자를 파악하여 적절히 제어하는 것이 중요하다. 분쇄조업에서 시멘트 입도분포에 영향을 주는 인자로는 Mill system 설비 (Separator의 종류, Efficiency, Liner, Ball size 등), 분쇄조제, Mill내 온도, Mill

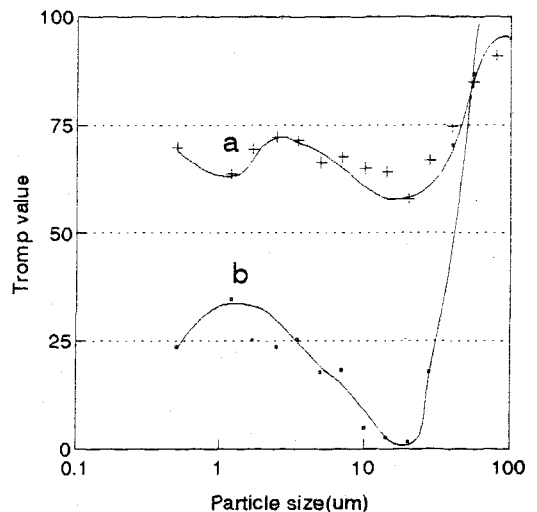


FIG. 2 O-Sepa와 Sturtevant Separator의 Tromp curve

Table 4 Separator efficiency 및 입도분포

구분	Separator efficiency				Particle Size Distribution						
	Circulating load	Terra 지수	조립의 분할율	불완전도	Blaine (cm ² /g)	88 μ m/44 μ m	ESF (0-3 μ m)	QCF (μ m)	0-32 (3-32 μ m)	Rosin-Rammler	
										n	Xo
O-Sepa	2.48	14.2	4.49	0.302	3200	0.9/9.7	15.9	63.7	79.6	0.993	21.92
Sturtevant type	4.53	*19.64	56.70	*0.349	3480	2.5/16.2	14.5	55.3	69.8	0.925	27.37

ventilation, 운전조건 등이다.

1) Mill system이 시멘트 입도분포에 미치는 영향

폐회로 Mill system에서 입도분포에 영향을 주는 가장 중요한 인자는 Separator의 분급효율이다. Fig. 2에서는 2개의 다른 특성의 Tromp curve를 나타내었고 Table 4은 두 Separator의 효율과 입도분포를 나타내었다. a는 Sturtevant type separator이고 b는 O-Sepa이다.

Tromp curve에서 30 μ m 이하에서의 Bypass parameter가 적어질수록 상대적으로 강도발현영역의 입균이 증가한다. 이것보다 더 중요한 것은 Coarse fraction의 분급특성을 나타내는 Tromp curve의 오른쪽부분인데 이것이 100%에 가까울수록 정분으로 들어가는 Coarse particle 이 적어지게 된다. 현 대부분 Separator는 Fishhook 효과에 의한

조립의 분할율이 발생하기 때문에 Coarse fraction에서의 Sharpness가 중요한 요소가 된다. 당사 Air Separator 에서 조립의 분할율을 나타내는 Bypass parameter와 Sharpness를 나타내는 Terra Parameter와 입도분포와의 관계를 Fig. 3, 4에 나타내었다.

이러한 Separator efficiency에 영향을 주는 인자는 Separator의 종류 및 Mill system에 의해 가장 큰 영향을 받고 동일 System 내에서는 circulating load, 분쇄조제, Ball charge, Mill설비(Liner, Diaphragm), Mill ventilation 등이 주요인자이다. Circulating load에 따른 Tromp curve는 Fig. 5에 나타내었다.

동일 고효율 Separator(O-Sepa)라 하더라도 설계특성에 맞는 적절한 Circulating load로 운전할 경우 Air와 material의 적정비가 유지되므로 분급특성이 좋아지고 따라서 입도분포도 향상된다. 또한

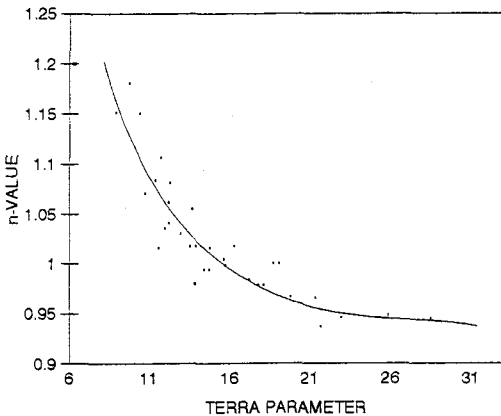


Fig. 3 Terra parameter와 n값과의 관계

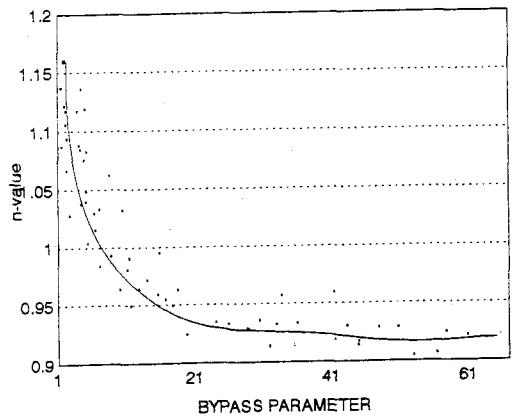


Fig. 4 Bypass parameter와 n값과의 관계

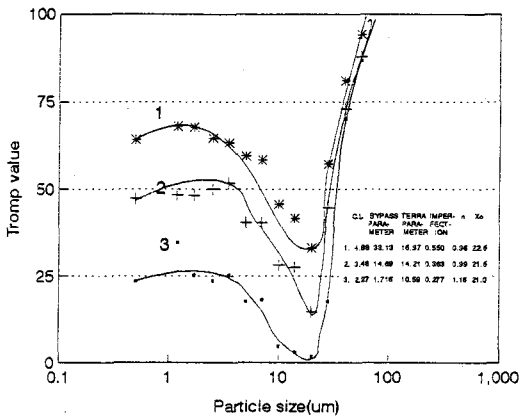


Fig. 5 O-Sepa의 Circulating load에 따른 Separator efficiency와 입도분포 변화

Separator의 풍량이 적정할 때 분급특성도 양호해지고 입도분포도 향상된다.(Fig. 6)

그리고 분쇄조제는 폐회로 Mill system에서 유동성을 향상시켜 Separator의 효율을 향상시킨다. Fig. 7, 8은 분쇄조제 사용시와 미사용시 Sturtevant type과 O-Sepa의 Tromp curve이고 Table 5는 관련 Data이다.

분쇄조제 사용시 순환율이 낮아지고, Bypass parameter도 감소하며 Sharpness도 증가함을 확인하였고 입도 분포도 좋아졌다. 그와⁽¹⁰⁾ Mill내 온도가

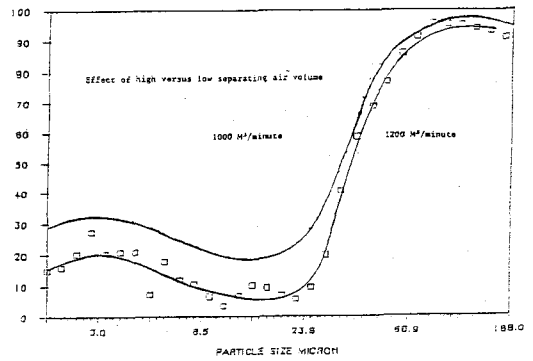


Fig. 6 Separator air량에 따른 Tromp curve변화

높을시 석고의 탈수로 인해 2수석고가 β형 반수석고, β형 무수석고로 전이될 확률이 높으므로 벽계면상의 이온이 편기되어 활성 표면이 생겨 응집의 발생이 심해짐으로 인해 분급효율저하로 입도 분포가 나빠지게 된다. 즉 시멘트 입도분포에 가장 중요한 영향을 주는 인자는 Separator의 분급특성이며 이것은 Separator type, Circulating load, Mill 설비 (Liner, Diaphragm, Ball 배열), 분쇄조제, Mill내 온도, Mill ventilation, 운전조건 등이며 이러한 변수가 최적화되었을 때 양호한 입도분포가 얻어짐을 확인하였다.

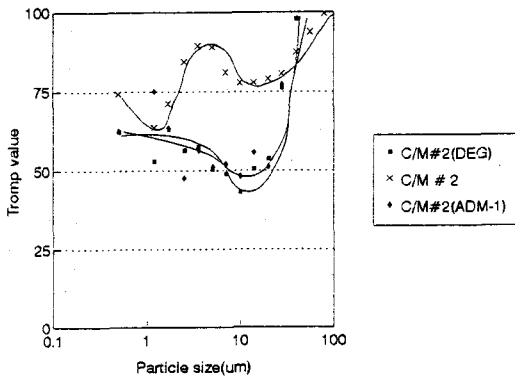


Fig. 7 분쇄조제 사용에 따른 Sturtevant type separator의 Tromp curve변화

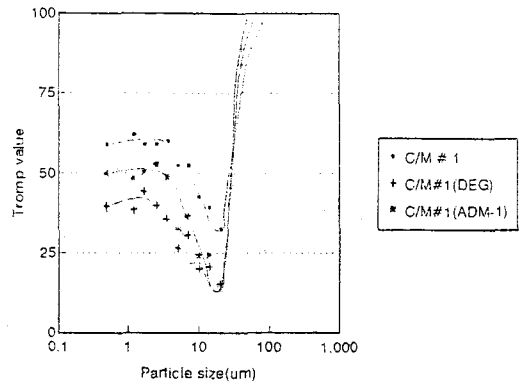


Fig. 8 분쇄조제 사용에 따른 O-Sepa의 Tromp curve 변화

Table 5 분쇄조제가 Separator efficiency에 미치는 영향

구 분		Separator efficiency			Particle size distribution	
		Circulating load(A/F)	Bypass paramter	Terra parameter	n	Xo
기존 C/M #1 (Sturtevan - t type)	무첨가	5.24	66.45	32.82	0.909	28.18
	DEG	4.53	56.70	19.64	0.925	27.37
기존 C/M #2 (Sturtevan - t type)	무첨가	7.20	77.08	18.18	0.947	24.13
	DEG	4.28	40.68	15.25	0.974	24.00
중설 C/M #1 (O-Sepa)	무첨가	3.06	29.16	20.28	0.943	21.27
	DEG	2.54	11.52	13.86	0.977	21.79

2) Mill운전조건이 시멘트 입도분포에 미치는 영향

Cement Mill의 조업조절변수로는 Mill내로 투입되는 Feeding량, Separator의 Rotor speed, Fan damper가 있다.

이러한 조업조절변수는 전에 기술했던 Separator type, Mill system 설비(Liner, Ball배열), 분쇄조제, Mill내 온도, Mill ventilation등 복합적인 변수들과 결합하여 입도분포를 결정하기 때문에 Rosin-Rammler의 n값에 대한 영향을 파악하기는 어렵다. 그러나 Position parameter Xo는 조업조절 변수만으로도 조절이 가능하다.

Fig. 9, 10, 11에서는 Mill의 조업조절변수가 Position

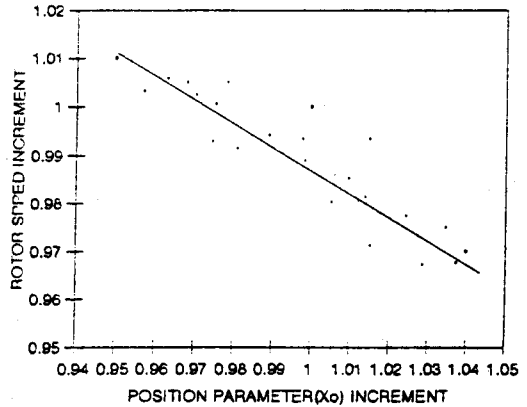


Fig. 10 separator rotor speed가 Position parameter에 미치는 영향

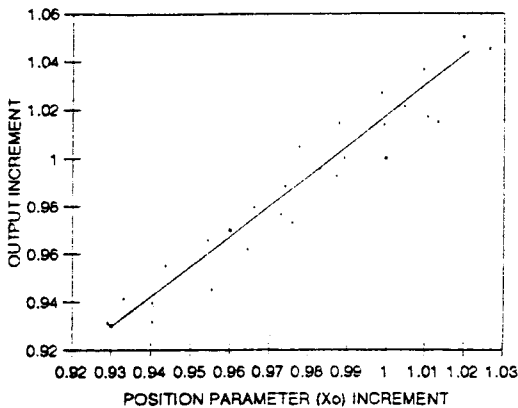


Fig. 9 Feeding량이 Position parameter에 미치는 영향

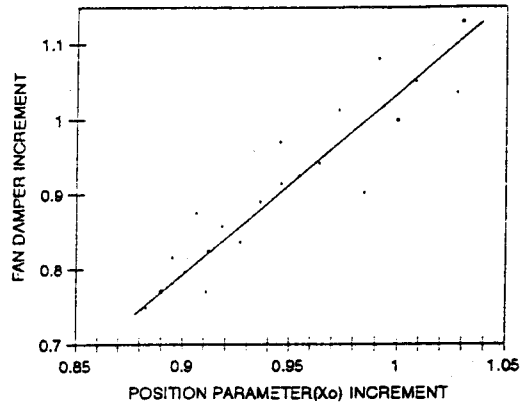


Fig. 11 Fan damper가 Position parameter에 미치는 영향

Parameter X_0 에 미치는 영향을 증감율로 나타내었다.

IV. 결론

1. 입도분포가 시멘트품질에 미치는 영향을 파악하기 위해 94년도 입도분석 시료 191개에 대해 조사한 결과 현장에서 공정관리중인 Blaine, $44\mu\text{m}$ 잔사량과 압축강도와의 결정계수(R^2)는 0.3, 0.4로 낮은 반면 ROSIN-RAMMLER-BENNETT의 입도분포 매개변수인 균일도 계수 N과 위치상수 X_0 를 이용하면 주도와와의 결정계수는 0.9, 압축강도는 0.7로 비교적 우수하여 입도의 전구간을 정확히 표현할뿐만아니라 분쇄조업에 있어서 품질특성을 파악하는데 있어서도 개선된 방법임을 확인하였다.

2. 시멘트품질에 있어서 입도분포가 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해 실시한 공정실험에서 Position parameter X_0 와 시멘트 압축강도와의 관계는 상관계수가 3일강도는 $r=0.86$, 7일강도는 $r=0.96$, 28일 강도는 0.91로 높은 상관성을 보여 Cement 품질을 설명하는데 적합한 매개변수임이 확인되었다.

3. 시멘트 입도분포에 영향을 미치는 가장 중요한 인자로는 Separator의 종류 및 Efficiency 인데 Tromp curve의 매개 변수중 조립의 분할율을 나타내는 Bypass parameter와 Sharpness를 나타내는 Terra parameter가 중요한 변수임을 확인하였다.

4. Mill 내 온도가 높으면 이수석고의 탈수에 의한 응집의 형성으로 입도 분포가 나빠지나 분쇄 조제는 응집의 발생을 제어하여 유동성을 향상시켜 Separator의 효율이 향상되므로 입도 분포가 양호해지고 또한 Mill 설계특성에 맞는 적절한 Circulating load로 운전할 경우 Air와 Material의 적정비가 유지되므로 분급특성이 좋아지고 입도분포도 향상된다. 그리고 Separator내 적정한 통풍량도 Separator의 분급 특성을 양호하게 한다.

5. Cement Mill 조업조절변수(Feeding 량, Rotor speed, Fan damper)에 의한 공정 시험 결과 위치상수 X_0 는 조업조절변수만으로도 조절 가능한 것으로 나타났다.

결과적으로 양호한 입도 분포를 얻기 위해서는 입도

분포에 영향을 주는 Mill system (Separator 종류, Liner, Ball size 등)와 Separator efficiency, Circulating load, Mill내 온도, 분쇄조제 사용량, Mill Ventilation 등과 같은 요인들을 최적화 함으로써 달성될 수 있다.

(참고 문헌)

1. K.Kuhlmann, G.H Ellerbrock and S.Sprung, "Particle size distribution and Properties of cement-Part I: Strength of Portland cement", ZEMENT-KALK-GIPS, 38, 4, 169(1985)
2. K.Kuhlmann, G.H Ellerbrock and S.Sprung, "Particle size distribution and Properties of cement-Part II: Water demand of Portland cement", ZEMENT-KALK-GIPS, 37, 9, 275(1985)
3. K.Kuhlmann, G.H Ellerbrock and S.Sprung, "Particle size distribution and Properties of cement-Part II: Influence of the Grinding process", ZEMENT-KALK-GIPS, 43, 1, 13(1990)
4. 박성현, "현대 실험 계획법", 대영사, 463(1993)
5. B.Beke, "Grinding body size and the", Cement Technology March/April, 47(1973)
6. Cement 기술 총론, 산업 도서, 동경(1970)
7. C.L.Prasher, "Crushing and Grind Process Handbook, John Wiley & Sons Limited, 87 (1987)
8. Holderbank Cement Seminar Process Technology 1, VOL3, Swiss
9. Technical Data, Magotteaux 사
10. 박영수, 이대호, "분쇄 조제에 관한 연구"(1), 2 (1994)
11. 김기범, 이정범, 이형두, 전귀, "시멘트 밀에서 입도와 생산량과의 관계", Cement symposium, 108(1993)
12. 박문철, 방성호, 김기범, 이형두, 홍창식, "분쇄조업에 있어서 품질개선에 관한 연구", Cement symposium, 83(1994)